



Les travertins anthropiques, entre histoire, archéologie et environnement : étude geoarchéologique du site antique de Jebel Oust (Tunisie)

Julien Curie

► To cite this version:

Julien Curie. Les travertins anthropiques, entre histoire, archéologie et environnement : étude geoarchéologique du site antique de Jebel Oust (Tunisie). Géographie. Université de Bourgogne, 2013. Français. NNT : 2013DIJOL032 . tel-01124215

HAL Id: tel-01124215

<https://theses.hal.science/tel-01124215>

Submitted on 6 Mar 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE BOURGOGNE
UMR ARTEHIS 6298
Archéologie, Terre, Histoire et Sociétés

THÈSE
Pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université de Bourgogne

Discipline : Géoarchéologie

par
Julien CURIE

22 novembre 2013

Les travertins anthropiques,
entre histoire, archéologie et environnement
Étude géoarchéologique
du site antique de Jebel Oust, Tunisie.

Directeur de thèse :
Christophe PETIT

Membres du Jury :

Éric FOUACHE - Professeur / Université de Paris Sorbonne-Abou Dhabi (Paris 4) - Rapporteur

Cees W. PASSCHIER - Professeur / Université de Mayence (Allemagne) - Rapporteur

Gérard CHARPENTIER - Ingénieur de recherche CNRS / Université de Lyon 2 - Examinateur

Emmanuelle VENNIN - Professeur / Université de Bourgogne - Examinatrice

Aïcha BEN ABED - Directrice de recherche / Institut National du Patrimoine (Tunisie) - Membre invité

John SCHEID - Professeur / Collège de France - Membre invité

Christophe PETIT - Professeur / Université de Panthéon-Sorbonne (Paris 1) - Directeur de thèse

UNIVERSITÉ DE BOURGOGNE
UMR ARTEHIS 6298
Archéologie, Terre, Histoire et Sociétés

THÈSE
Pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université de Bourgogne

Discipline : Géoarchéologie

par
Julien CURIE

22 novembre 2013

Les travertins anthropiques,
entre histoire, archéologie et environnement
Étude géoarchéologique
du site antique de Jebel Oust, Tunisie.

Directeur de thèse :
Christophe PETIT

Membres du Jury :

Éric FOUACHE - Professeur / Université de Paris Sorbonne-Abou Dhabi (Paris 4) - Rapporteur

Cees W. PASSCHIER - Professeur / Université de Mayence (Allemagne) - Rapporteur

Aïcha BEN ABED - Directrice de recherche / Institut National du Patrimoine (Tunisie) - Examinatrice

Gérard CHARPENTIER - Ingénieur de recherche CNRS / Université de Lyon 2 - Examineur

John SCHEID - Professeur / Collège de France - Examineur

Emmanuelle VENNIN - Professeur / Université de Bourgogne - Examinatrice

Christophe PETIT - Professeur / Université de Panthéon-Sorbonne (Paris 1) - Directeur de thèse

« Every archaeological problem starts as a problem in geoarchaeology. »

C. Renfrew, 1976 – *Archaeology and the earth sciences*.

REMERCIEMENTS.

Je remercie mon directeur de thèse, Christophe Petit, d'être à l'origine de ce travail et de l'avoir dirigé durant ces années, pour son aide au cours des missions sur le terrain et pour son soutien infaillible durant ces années à Dijon puis à Paris.

Les missions de terrain sur le site de Jebel Oust ont été effectuées dans le cadre d'une collaboration entre l'Institut National du Patrimoine de Tunisie et le Collège de France, avec le soutien de l'Ecole Française de Rome, du Ministère des Affaires Etrangères et Européennes et de l'Institut français de Coopération. Je remercie Aïcha Ben Abed et John Scheid, responsables de la mission tuniso-française en charge de l'étude du site de Jebel Oust.

Je remercie humblement et chaleureusement les membres du Jury d'avoir accepté de juger mon travail : Eric Fouache, Cees W. Passchier, Emmanuelle Vennin, Gérard Charpentier.

Je remercie Henri Broise, responsable de l'étude des thermes antiques de Jebel Oust, pour son soutien, sa riche et très précieuse collaboration, son aide et son franc regard sur mon travail.

Ce travail s'est effectué au sein de l'UMR ArTeHiS à l'Université de Bourgogne, dont je remercie l'ensemble des membres pour leur accueil et leur aide à tout moment, particulièrement Laetitia Bassereau, Brigitte Colas, Sophie Desbois-Garcia, Amélie Quiquerez, Claire Touzel, Jean-Pierre Garcia, Fabrice Monna, Claude Mordant, Stephan Wirth.

Mes sincères et respectueux remerciements à Christophe Durllet, Emmanuelle Pucéat et Pierre Pellenard, de l'UMR Biogéosciences à Dijon pour leur aide et leur collaboration à ce travail.

Je remercie pour leur aide, technique et administrative, et pour l'organisation de ma vie au sein de l'UFR des Sciences de la Terre et de l'Environnement à Dijon, Evelyne Debierre, Marie-Claire Geoffroy, Nathalie Guichard, Annie Marchand, Nicole Vitale, Philippe Amiotte-Suchet, Jean-François Buoncristiani, Dominique Champagnac, Jean-François Deconinck, Alain Festeau, Olivier Mathieu, Jean Lévêque, Pascal Taubaty, Didier Quesne.

Je remercie l'ensemble des membres de l'UFR Géographie et Aménagement de l'Université Paris-Sorbonne (Paris IV), et son directeur Guy Chemla, pour leur accueil et mon intégration lors de mon année d'ATER.

Je remercie pour leur collaboration analytique Nils Andersen (Université de Kiel, Allemagne), Christophe Renac (Université de Saint-Étienne), Vincent Bichet et Hervé Richard (Université de Franche-Comté), ainsi que Quentin Lemasson et Claire Pacheco (C2RMF) pour leur accueil et leur aide précieuse à AGLAE.

Merci aux personnes qui ont contribué indirectement ou directement à ce travail, Michel Reddé (EPHE), Dominique Goguet (Université de Chambéry), René Goguet, Fayçal Rejiba (Université Paris VI), Gilles Fronteau (Université de Reims), Lise Leroux (LRMH), Hedi Maazaoui et Jean-Marc Bourgeon (MSH de Dijon), Yves Pautrat (DRAC Bourgogne), Sophie Bouffier (Université Aix-Marseille), Jean-Pierre Van Staëvel, Thibaud et Pauline Fournet (IFPO), Françoise Vannier-Petit, Nico, Juju et Hélène, Isabelle et Thomas Broise, et la communauté italienne des travertins, représentée par Anna Gandin et Enrico Capezzuoli de l'Université de Sienne.

J'exprime mes plus sincères et amicaux remerciements à l'ensemble des membres de l'équipe de Jebel Oust (le *Magic Circus et ses animaux tristes*, dicit « Le chef ») : Stéphane Abellon, Nathalie André, Mekki Aoudi, Catherine Balmelle, Hamden Ben Rhomdane, Fabrice Bessière, Solange Biaggi, Céline Brun, Sandrine Crouzet, Raphaël Durost, Raphaël Golosetti, Catharina Jaquet, Aïcha Malek, Jeannot Metzler, Haithem Msaddak, Tomo Mukai, Jean-Louis Paillet, Emmanuelle Rosso, Nicolas Monteix, Pierre Wech, et à toute l'équipe de fouilleurs dont le travail fait revivre le site et contribue à sa sauvegarde, ainsi qu'à la direction et au service technique du centre thermal actuel.

Je veux remercier mes nombreux collègues et amis côtoyés au cours de mon parcours universitaire, Antoine Chabrol, Vincent Ollive, Frédéric Cruz, Jérôme Brenot, Emmanuel Chevigny, Benjamin Bohard, David Cambou, Caroline Lachiche, Julie Dabkowski, Evelyne Deweirdt, Rodrigue Guillon, Marion Foucher, Ronan Steinmann, Jimmy Linton, Elise Cellier-Holzem, Alexandra Cordier, Martin (le canadien grec), Aurélie (Sicile), Estelle Camizulli, Mathieu Martinez, Christophe Kolodka, Aurélie Turmel, Maréva Gabillot.

Salutations et merci à Tomtom, Samouel, Pierrot el Manières, Malo (f....e) et Freaky, Rémy et Mimi, Nico, petit Sam, Adrien, mon grand Kab', K'ro, Aurel', Cécile et Gaétan, Aude, Melie, Pete, Jéjé Noto, Gilou, Seb Poipoiz, Don José, Steph Paday, Gallinette, Titi et Zuguinio, et les amis grecs.

Enfin, je n'oublie pas ma famille. MERCI à ma maman et mon papa ; à Guillaume et Jo, et Max et ma petite Luna ; à Gwen et David, et mes loulous Paulo, Tatouille et Mathis, et ma toute petite Jade ; à mon grand petit Neilou ; à ma petite Nini et à Yanou et Charly ; à Jeannine, Bernard et Monique, Annie et Jean-Pierre, Martine et Jean-Jacques ; à Dav' et Fred, Lolo et Véro, Benj et Anne-Laure, Tom, Ben et Chrys, Nadège et Jé ; à mes chers Thierry et Mumu, Aurélie et Olivia.

Last but not least, merci à Elise (*ma petite fée*), à Clem', Caro et Lucie, à Fanou et Christian.

À tous, un chaleureux et amical merci !

RÉSUMÉ.

Le travertin, connu sous le terme de *lapis tiburtinus* dans l'Antiquité romaine, est une roche issue de la précipitation du carbonate dissous dans les eaux de sources chaudes (travertins) ou froides (tufs calcaires), sous l'influence de processus physico-chimiques et/ou biologiques. Ce phénomène est décrit dès l'époque gréco-romaine par les auteurs antiques (Strabon, Pline l'Ancien, Vitruve), qui témoignent d'une roche qui se forme sous leurs yeux, qui dessine le paysage et qui est largement exploitée pour la construction (p. ex. le Colisée à Rome, le Temple grec de Ségeste en Sicile). Abondamment répartis à la surface de la Terre et caractérisés par une certaine diversité morphologique, les travertins représentent d'excellents enregistreurs des conditions climatiques et hydrologiques de leur dépôt, offrant un potentiel très fiable d'archives sédimentaires utilisées au sein de problématiques paléoenvironnementales.

La notion de *travertins anthropiques* définie ici prend en compte l'influence de l'Homme sur ces formations sédimentaires et les eaux qui leur sont associées. Elle est illustrée par une approche géoarchéologique des dépôts de travertins préservés sur le site antique de Jebel Oust, en Tunisie, où l'exploitation d'une source chaude est attestée depuis le début de notre ère jusqu'à son tarissement dès la fin de l'Antiquité tardive. La source thermique surgissant sur le versant oriental de la montagne fut l'objet d'un culte aux époques romaine puis paléochrétienne et alimentait en eau chaude, par le biais d'un aqueduc, un édifice thermal localisé en aval. Notre approche géoarchéologique met en lumière l'anthropisation du versant qui se traduit par un contrôle du fonctionnement de la source chaude et des dynamiques sédimentaires associées. En parallèle, l'analyse des travertins préservés au sein des structures antiques révèle des informations primordiales sur les conditions de déroulement du culte et sur les pratiques balnéaires (fonction des salles thermales, gestion de l'eau, phases de réfection, états d'abandon).

Une vision plus générale d'une géoarchéologie des *travertins anthropiques* propose une nouvelle approche des problématiques liées à l'eau, insistant sur la gestion plus ou moins complexe d'une source carbonatée, chaude ou froide, et précisant le degré d'impact humain sur le développement des travertins.

Mots-clés : géoarchéologie, travertins, tufs calcaires, Antiquité, Tunisie, Jebel Oust, source chaude, impact anthropique, anthropisation de l'environnement, culte des eaux, sanctuaire de source, thermes romains, aqueduc, géochimie des carbonates, isotopes stables, auteurs antiques.

ABSTRACT.

Travertines, known as *lapis tiburtinus* during Roman times, are continental limestones precipitated in calcareous environments from thermal waters of hot springs (travertine) or cool waters of karstic springs (calcareous tufa). This phenomenon is well-known during Classical Antiquity and had been described by several ancient authors (Strabo, Pliny the Elder, Vitruvius) who depicted a stone that forms extremely rapidly, a stone that outlines the landscape and which is largely used for construction (*e.g.* The Colosseum in Roma, the Greek temple at Segesta in Sicily). These deposits are widespread on Earth's surface showing various morphologies and are great sedimentary records of climatic and hydrologic conditions. Thus they represent valuable proxies for palaeoenvironmental studies.

The notion of *anthropogenic travertines* takes into consideration human impact on these deposits and on travertine-depositing waters. It is documented with the study of the roman site of Jebel Oust, Tunisia, where the exploitation of a hot spring is attested from the first century *A.D.* to the end of Late Antiquity. The site is characterized by a temple settled around the spring's vent associated with Roman baths located downstream and supplied with hot water via an aqueduct. Our geoarchaeological approach brings to light the anthropization of the regional geosystem expressed by an entire control over the hot spring and its associated deposits. Furthermore the study of travertines preserved in the archaeological structures reveals precious and original information about water cult and bathing practices during Antiquity (thermal rooms function, water management, repair phases, states of neglect and decay).

Moreover, geoarchaeology of *anthropogenic travertines* intends to offer a new approach of research's problematic dealing with water managements and integrating human impact on travertine's development.

Keywords : *geoarchaeology, travertine, calcareous tufa, Antiquity, Tunisia, Jebel Oust, hot spring, human impact, environment anthropization, water cult, spring sanctuary, Roman baths, aqueduct, carbonates sedimentology and geochemistry, stable isotopes, ancient authors.*

SOMMAIRE

INTRODUCTION	21
PARTIE A - LES TRAVERTINS ANTHROPIQUES :	
ÉTAT DE LA QUESTION ET NOUVELLE DÉFINITION	29
A.I. LES TRAVERTINS ET TUF CALCAIRES : UNE DÉFINITION PROBLÉMATIQUE	31
A.I.1. Les travertins et tufs calcaires : une nomenclature et une définition instables	31
A.I.1.1. Une roche et un processus sédimentaire connus dès l'Antiquité	31
A.I.1.1.1. Le témoignage des sources écrites antiques : une roche caractéristique et caractérisée	31
A.I.1.1.1.1. La « Pierre de Tibur »	31
A.I.1.1.1.2. Un processus sédimentaire connu et décrit, dans la nature jusque dans la poésie	32
A.I.1.1.1.3. Une roche qui dessine le paysage	34
A.I.1.1.1.4. Une roche particulière, utilisée dans la construction	35
A.I.1.1.2. L'essor apporté par les sciences modernes	37
A.I.1.2. La définition actuelle	37
A.I.1.3. Les processus de dépôt des travertins <i>s.l.</i>	39
A.I.2. Les méthodes d'étude et les problématiques scientifiques	41
A.I.2.1 Caractérisation sédimentaire	41
A.I.2.1.1. Morphologie et géométrie des dépôts	41
A.1.2.1.1.1. Les travertins	42
A.1.2.1.1.2. Les tufs calcaires	46
A.I.2.1.2. Caractérisation pétrographique des travertins <i>s.l.</i>	51
A.I.2.1.2.1. La fabrique (<i>fabric</i>)	51
A.I.2.1.2.2. La sédimentologie de faciès	54
A.I.2.2. Caractérisation géochimique des travertins <i>s.l.</i> et des eaux associées	59
A.I.2.2.1. Les isotopes stables	59
A.I.2.2.1.1. L'oxygène	61
A.I.2.2.1.2. Le carbone	65
A.I.3. Le potentiel paléoenvironnemental des travertins <i>s.l.</i>	68
A.I.3.1. Le problème spécifique des laminations	68
A.I.3.2. Reconstitution des paléoenvironnements et paléoclimatologie	71
A.I.4. L'empreinte de l'Homme dans les travertins <i>s.l.</i>	74
A.I.4.1. Les travertins <i>s.l.</i> , sources de matériaux	75

A.I.4.1.1. Les travertins <i>s.l.</i> , sources de matériaux pour la construction	75
A.I.4.1.1.1. Son utilisation à l'époque préromaine.	75
A.I.4.1.1.2. Son utilisation dans l'Antiquité romaine :	75
A.I.4.1.1.3. Son utilisation de l'époque médiévale à aujourd'hui.	78
A.I.4.1.2. La diversité d'utilisation du travertin : son emploi dans certaines pratiques alimentaires et dans les domaines de la sculpture et de la médecine	80
A.I.4.2. L'impact anthropique sur le développement des tufs calcaires	82
A.II. LE RÔLE DE L'EAU DANS L'ANTIQUITÉ ROMAINE	84
A.II.1. La place de l'eau dans les civilisations historiques	84
A.II.1.1. Des projets hydrauliques considérables	84
A.II.1.2. La place de l'eau dans la civilisation romaine	86
A.II.2. Les aqueducs romains	86
A.II.3. Le culte des eaux et des sources dans le monde romain	88
A.II.4. Les bains et les pratiques balnéaires dans l'Antiquité gréco-romaine	89
A.II.4.1. Les pratiques du bain à l'époque romaine	91
A.II.4.1.1. Des bains hellénistiques aux bains romains	91
A.II.4.1.2. Le cas spécifique de l'exploitation d'une eau chaude	93
A.III. LE CAS SPÉCIFIQUE DES <i>TRAVERTINS S.L. ANTHROPIQUES</i>	95
A.III.1 Pourquoi une nouvelle définition ?	95
A.III.1.1. Du naturel à l'anthropique	95
A.III.1.2. Le rôle de l'homme dans la dynamique sédimentaire	95
A.III.1.3. Ma définition des <i>travertins s.l. anthropiques</i>	96
A.III.2. Illustration de la diversité des <i>travertins s.l. anthropiques</i> : un premier inventaire	97
A.III.2.1. Les travertins <i>s.l.</i> de sites d'extraction	97
A.III.2.1.1. Les tufs calcaires : l'exemple du site de Rolampont (Haute-Marne, France)	97
A.III.2.1.2. Les travertins : les exemples dans le bassin méditerranéen (Italie et Tunisie)	98
A.III.2.2. Les tufs calcaires de canaux agricoles : les « tecoatl » pré-aztèques (Mexique)	99
A.III.2.3. Les travertins <i>s.l.</i> d'aqueducs antiques	100
A.III.2.3.1. Les tufs calcaires des aqueducs, châteaux d'eau et fontaines antiques	100
A.III.2.3.2. Les travertins d'aqueducs	105
A.III.2.4. Les travertins <i>s.l.</i> de thermes antiques	106
A.III.2.4.1. Les tufs calcaires préservés dans des thermes antiques : les exemples gallo-romains	106

B.I.2.2.2. Les conditions environnementales en Afrique du Nord à l'époque antique	140
B.I.2.2.2.1. Le modèle proposé par les historiens	140
B.I.2.2.2.2. L'apport des géosciences de l'environnement	141
B.I.3. Le système géothermal régional de Jebel Oust	143
B.I.3.1. Le modèle géothermal	143
B.I.3.1.1. Un système d'émergence par diaclases	143
B.I.3.1.2. Caractérisation physique et géochimique des eaux de la région de Jebel Oust	144
B.I.3.1.2.1. Caractérisation physico-chimique de l'eau thermale de Jebel Oust	144
B.I.3.1.2.1.1. Caractérisation physique	144
B.I.3.1.2.1.2. Caractérisation chimique	147
B.I.3.1.2.3. Géochimie des isotopes stables des eaux de la région	149
B.I.3.2. Le captage actuel et la station balnéaire associée	152
B.I.3.2.1. La redécouverte de la source chaude	152
B.I.3.2.2. L'exploitation de la source chaude par le complexe balnéaire	153
B.I.3.2.3. Les deux environnements actuels de dépôt	153
B.II. LES TRAVERTINS ANTHROPIQUES DU SITE DE JEBEL OUST :	
CARACTÉRISATION GÉOLOGIQUE	157
B.II.1. Le dépôt de travertins naturels : caractérisation morphologique	157
B.II.1.1. Les travertins naturels dans le secteur du temple et de l'évent thermal	157
B.II.1.2. Les travertins naturels sur la pente/ <i>clivus</i>	158
B.II.1.3. Les travertins naturels dans la partie de l'édifice thermal	158
B.II.1.4. Les travertins naturels en marge des structures archéologiques	158
B.II.2. Caractérisation des <i>travertins anthropiques</i> antiques	162
B.II.2.1. Caractérisation géométrique et morphologique des <i>travertins anthropiques</i> antiques	162
B.II.2.1.1. Les <i>travertins anthropiques</i> du complexe sanctuaire/source chaude :	
les dépôts proximaux d'une eau captée	162
B.II.2.1.2. Les <i>travertins anthropiques</i> intermédiaires de l'aqueduc thermal	162
B.II.2.1.3. La diversité des <i>travertins anthropiques</i> de l'édifice thermal : les dépôts distaux	163
B.II.2.1.3.1. Les travertins de piscines	163
B.II.2.1.3.2. Les travertins muraux	163
B.II.2.1.3.3. Les travertins de canalisation	164
B.II.2.1.3.4. Les amas de travertins	164
B.II.2.1. Caractérisation géochimique des <i>travertins anthropiques</i> antiques	167
B.II.2.1.2. Les travertins de Jebel Oust au sein des travertins mondiaux	167
B.II.2.1.2. Des dépôts proximaux jusqu'aux dépôts distaux.	168

B.II.3. Des travertins naturels aux <i>travertins anthropiques</i> à Jebel Oust	173
B.III. LA GÉOARCHÉOLOGIE DES <i>TRAVERTINS ANTHROPIQUES</i>	
DU COMPLEXE LIEU DE CULTES/SOURCE CHAUDE/THERMES DU SITE ANTIQUE DE JEBEL OUST	175
B.III.1. La zone cultuelle et l'aqueduc	175
B.III.1.1. Les deux niveaux de captage de la source et les deux états du sanctuaire	175
B.III.1.1.1. Un premier captage : le niveau supérieur	176
B.III.1.1.2. Un second captage : la grotte et les conduites inférieures	178
B.III.1.2. L'aqueduc depuis la zone cultuelle/source jusqu'aux thermes	185
B.III.1.2.1. Le départ de l'aqueduc : la coupe sédimentaire C1	185
B.III.1.2.2. Un colmatage semblable 5 m plus en aval du départ de l'aqueduc, dans la coupe C2	189
B.III.1.2.3. A mi-pente, un colmatage sédimentaire en <i>puff pastry</i> : la coupe C3	194
B.III.2. Géoarchéologie des travertins anthropiques de l'édifice thermal antique	202
B.III.2.1. Le faciès sédimentaire des travertins des thermes,	
reflet de la nature et de la fonction des structures hydrauliques	202
B.III.2.1.1. Localisation des échantillons de travertins dans l'édifice thermal	202
B.III.2.1.2. Les travertins à lamines millimétriques et régulières : le faciès A	203
B.III.2.1.3. Les travertins à lamines denses et poreuses : le faciès B	207
B.III.2.1.4. Les travertins à structure spongieuse : le faciès C	211
B.III.2.1.5. Les travertins fins muraux laminés : le faciès D	215
B.III.2.1.6. Les travertins à lamines millimétriques oranges : le faciès E	217
B.III.2.1.7. Les travertins de canalisation : le faciès F	220
B.III.2.2. L'analyse d'une séquence laminée :	
l'apport de l'analyse d'un travertin à la chronologie relative de la salle T1	225
B.III.2.2.1. Localisation et stratégie d'échantillonnage	225
B.III.2.2.2. Analyse semi-automatisée de la séquence laminée	226
B.III.2.2.3. Une période d'utilisation minimale de la salle T1 de 43 ans	229
B.III.2.2.4. Un signal paléohydrologique	230
B.III.2.3. L'histoire <i>géoarchitecturale</i> d'une salle :	
une confrontation de l'analyse architecturale et de l'étude géoarchéologique de la salle T6	232
B.III.2.3.1. Les états 1 et 2 : un espace de circulation	232
B.III.2.3.2. Les états 3 et 4 : un bassin peu profond à alimentation double	232
B.III.2.3.3. L'état 5 : un bassin profond, à alimentation unique en eau thermale	235
B.III.2.3.4. Synthèse <i>géoarchitecturale</i> de l'histoire de la salle T6	236
B.III.2.4. Mise en évidence de travaux de réfection dans les bassins par la lecture des travertins	239
B.III.2.4.1. L'évolution chronologique de la salle T5	239
B.III.2.4.2. Analyse stratigraphique et interprétation géoarchéologique du bourrelet de travertin	240
B.III.2.4.2.1. Description stratigraphique et interprétation géoarchéologique de la coupe A	241

B.III.2.4.2.2. Description stratigraphique et interprétation géoarchéologique de la coupe B	245
B.III.2.4.2.3. Description stratigraphique et interprétation géoarchéologique de la coupe C	247
B.III.2.4.3. Synthèse chronologique et géoarchéologique issue de l'étude des trois coupes A, B et C réalisées dans le dépôt de travertin périphérique	251
B.III.2.4.3.1. Une chrono-séquence type de la phase IV des thermes : phases de mise en eau et phases de réfection	251
B.III.2.4.3.2. Le changement de fonction de la salle T5	254
B.III.2.4.3.3. L'entretien permanent d'un domaine "thermal" devenu privé	254
B.III.2.5. L'histoire d'un tuyau : l'alimentation en eau de la salle T4	256
B.III.2.5.1. L'histoire de la salle T4	256
B.III.2.5.2. Etude géoarchéologique du tuyau d'eau tiède	257
B.III.2.6. L'apport des analyses à haute-résolution (PIXE)	262
B.IV. L'ANALYSE DU CONTENU SPORO-POLLINIQUE DES TRAVERTINS : UNE FENÊTRE SUR LE PAYSAGE VÉGÉTAL ANTIQUE DE JEBEL OUST	264
B.IV.1. Méthodologie de la palynologie et chaîne opératoire en contexte archéologique	264
B.IV.2. Des grains de pollen préservés dans les travertins de Jebel Oust ?	265
B.IV.2.1. Une stratégie raisonnée de l'échantillonnage : un panel d'échantillons représentatif	265
B.IV.2.2. Le contexte chronologique des échantillons	266
B.IV.2.3. Le contenu sporo-pollinique des travertins de Jebel Oust	266
B.IV.3. Résultats de l'analyse palynologique des travertins de Jebel Oust	268
B.IV.4. Commentaires des résultats de l'analyse palynologique des <i>travertins anthropiques</i> de Jebel Oust	271
B.IV.4.1. Une conservation différentielle dans le panel d'échantillons	271
B.IV.4.2. Un paysage végétal ouvert, sec et anthropisé	272
B.V. SYNTHÈSE GÉOARCHÉOLOGIQUE DES <i>TRAVERTINS ANTHROPIQUES</i> DU SITE DE JEBEL OUST	274
B.V.I. Un géosystème entièrement anthropisé dès le début de notre ère	274
B.V.II. L'histoire et l'exploitation de la source chaude	274
B.V.II.1. Un culte de source à l'époque romaine	274
B.V.II.2. Une exploitation différente à l'époque paléochrétienne	275
B.V.III. Les <i>travertins anthropiques</i> de thermes antiques de Jebel Oust	275

B.V.IV. D'une eau chaude captée à une eau gérée	276
 PARTIE C - POUR UNE GÉOACRHÉOLOGIE DES <i>TRAVERTINS ANTHROPIQUES</i>	 279
C.I. LA PRÉSERVATION DU SIGNAL GÉOARCHÉOLOGIQUE OFFERT PAR <i>LES TRAVERTINS ANTHROPIQUES</i>	281
C.II. UNE MÉMOIRE DE LA GESTION DE L'EAU	282
C.II.1. Les « eaux naturelles » : l'eau utilisée	282
C.II.2. L'eau captée et entretenue	282
C.II.3. L'eau gérée	283
C.III. POURQUOI UNE GÉOARCHÉOLOGIE DES <i>TRAVERTINS ANTHROPIQUES</i> ?	286
C.III.1. Une mémoire de la fonction des structures hydrauliques	286
C.III.2. Une approche de la température des eaux	286
C.III.3. Une nouvelle approche des problématiques liées à l'eau	286
 CONCLUSION	 289
 BIBLIOGRAPHIE	 293
LEXIQUE*	309
LISTE DES ILLUSTRATIONS	313
ANNEXES	319

* Les termes techniques renvoyant au lexique sont signalés dans le texte par un astérisque (*) lors de leur première apparition.

INTRODUCTION.

Le travertin, une roche et un matériau particuliers.

L*apis tiburtinus*. C'est en ces termes, littéralement et étymologiquement « la pierre de Tibur », qu'était désigné dans l'Antiquité romaine le **travertin**. Intensément exploitée au cours de cette période, particulièrement dans les grandes carrières à proximité de la ville antique de *Tibur*¹, cette pierre occupait une place particulière dans la société romaine.

Comme en témoignent les traces écrites laissées par les auteurs antiques tels que Strabon dans sa *Géographie*, Vitruve dans son traité *De Architectura*, ou encore Pline l'Ancien dans son *Histoire Naturelle*, cette roche, ainsi que le processus sédimentaire qui lui est associé étaient parfaitement connus, de manière empirique, dans l'Antiquité gréco-romaine. Ses excellentes propriétés mécaniques caractérisées par sa dureté et sa facilité à la taille, ajoutées à des qualités esthétiques certaines qui la rapprochent visuellement d'un véritable marbre, ont fait de cette roche un matériau largement exploité et abondamment utilisé, notamment dans la construction, depuis l'époque antique jusqu'à aujourd'hui. Chafetz et Folk (1984) résument parfaitement son intérêt économique dans la construction : « *It's [le travertin] probably the most economically valuable building stone in the world* ».

Aux dires de certains érudits antiques, l'importance de cette pierre est admise. Citons cette remarque rapportée par Pline l'Ancien (*H.N.*, XXXVI, 5), de Cicéron aux habitants de l'île de Chios en Grèce alors que ces derniers exhibent les murailles de leur ville : « **J'admirerais bien plus, dit-il, que vous les eussiez faites en pierre de Tibur** ». La remarque de Cicéron fait écho aux innombrables bâtiments de l'antiquité édifiés en travertin, dont certains sont de véritables monuments encore visibles de nos jours (le Colisée à Rome, par exemple).

Les travertins désignent des dépôts carbonatés continentaux dont la définition proposée aujourd'hui soulève encore, comme nous le verrons, quelques ambiguïtés et pose encore certains problèmes. L'école anglo-saxonne tend à englober dans ce terme l'ensemble des dépôts carbonatés continentaux dans un sens général, c'est-à-dire les travertins, les tufs calcaires, les spéléothèmes*, les dépôts fluviatiles et lacustres et les croûtes calcaires (Pentecost, 2005), tandis que l'école italienne (Capezzuoli et Gandin, 2004 ; Gandin et Capezzuoli, 2008) préfère réserver le terme travertin aux dépôts issus de source chaude similaires aux dépôts de la région du *Latium* (Italie), cherchant à pérenniser ainsi le sens étymologique du terme.

¹L'actuelle ville de Tivoli (région du Latium), située à environ 25 km à l'est de Rome.

Cette nomenclature spécifique, si ambiguë soit-elle, ne doit pas faire oublier que le processus sédimentaire à l'origine de cette roche, ou de ces roches, est un processus très rapide à l'échelle géologique et perçu à l'échelle humaine. Citons par exemple Vitruve témoignant de ce phénomène naturel dans un lac de la région de Cappadoce (Turquie actuelle) dans lequel « si l'on y fait tremper une canne ou autre chose, on la trouve **le lendemain** [...] pétrifiée par la partie qui a été dans l'eau » (Vitruve, *De Architectura*, Livre VIII). C'est cette même rapidité du processus sédimentaire à l'origine de la formation de travertin qui est encore souligné dans les études de synthèse actuelles : « *Travertines are the most rapidly deposited natural calcium carbonates known to form direct from solution* » (Pentecost, 2005, p. 197). Ce lien entre le savoir antique et nos connaissances actuelles, cette eau qui devient roche, est emblématique d'une nouvelle approche géoarchéologique et environnementale de travertins préservés au sein de structures archéologiques.

Les travertins : la « mémoire de l'eau ».

L'intérêt de la communauté scientifique pour les travertins s'est accentué au cours de ces dernières années, grâce à la pérennisation des travaux des naturalistes tels que Lavoisier (XVIII^e s.) et Cuvier (XIX^e s.) (Pentecost, 2005, p. 8) et, en parallèle, à l'essor des techniques d'étude et d'analyse employées dans les sciences de la Terre. Véritables archives sédimentaires des conditions environnementales, les travertins, au sens large du terme, ont été l'objet de nombreuses études, tant pour analyser leurs caractéristiques sédimentologiques (p. ex. Guo et Riding, 1998 ; Pedley, 2009) que géochimiques (p. ex. Gandin et Capezzuoli, 2008 ; Kele *et al.*, 2011). Ils ont fait l'objet d'une synthèse récente (Pentecost, 2005), permettant de faire un large point sur leur morphologie, leur géométrie, leur typologie, et leurs conditions de dépôt à travers le monde. Cette volonté de synthèse des dépôts de travertins mondiaux amène chaque auteur à proposer des classifications qui prennent en compte soit la nature et l'origine de l'eau de précipitation, soit les caractéristiques sédimentologiques et géochimiques, soit le contexte de dépôt et la morphologie du travertin. C'est dans la typologie morphologique que fut intégrés pour la première fois la notion de **travertins « d'origine anthropique »** (Fabre, 1986) pour désigner les travertins déposés dans des structures construites par l'Homme, notion reprise plus tard sous le terme plus général de « **travertins artificiels** » (« *artificial travertine* », Pentecost, 2005, p. 49). C'est cette notion que nous définirons et détaillerons dans ce travail, et dont nous verrons le potentiel dans le cadre des études sur l'eau en archéologie. Préservés au sein de structures archéologiques, les dépôts de travertin représentent des archives sédimentaires exceptionnelles et constituent une véritable « **mémoire de l'eau** ». Leur prise en compte dans un contexte archéologique a permis d'en exprimer le potentiel pour résoudre certaines questions, depuis les travaux pionniers réalisés sur l'aqueduc gallo-romain de Nîmes (Guendon et Vaudour, 2000) ou ceux sur l'aqueduc d'Arles (Guendon et Leveau, 2005), qui ont mis en lumière l'intérêt d'analyser ces sédiments pour comprendre l'histoire et le fonctionnement hydraulique de telles structures.

Pourquoi une étude géoarchéologique à Jebel Oust ?

La démarche que nous utiliserons ici pour aborder les travertins du site antique de Jebel Oust est une démarche géoarchéologique (Fouache, 2006 ; Fouache et Rasse, 2007). Au sens large du terme, la géoarchéologie se nourrit de nombreuses disciplines relevant des sciences de la Terre et des sciences de l'Homme pour étudier les relations entre l'Homme et son environnement. En plein essor depuis plus d'une vingtaine d'années et les prémices de son développement dans l'archéologie anglo-saxonne, la géoarchéologie se définit généralement comme une approche multi-disciplinaire traitant des relations entre les activités humaines et les dynamiques environnementales (Rapp et Hill, 1998 ; Ghilardi *et al.*, 2009). En parallèle à cette définition, il faut voir la géoarchéologie comme une discipline hybride employant les techniques et les méthodes issues des Géosciences pour répondre à un (des) questionnement(s) archéologique(s) (Petit, 2006). Elle doit être réalisée au sein d'une équipe pluri-disciplinaire réunissant archéologues, historiens, architectes, géologues, géomorphologues et environnementalistes et les résultats doivent être le fruit d'un dialogue scientifique permanent, tant sur le terrain qu'en laboratoire, entre les différents spécialistes.

La géoarchéologie tend à trouver sa place dans l'archéologie française depuis maintenant quelques années, tant en archéologie programmée qu'en archéologie préventive. De nombreuses études employant un panel diversifié d'approches méthodologiques et protocolaires (micromorphologie, pédologie, géochimie environnementale, etc.) rendent compte de son dynamisme dans des problématiques issues de l'« Archéologie environnementale ». Une telle approche révèle le lien entre l'archéologie et les géosciences, incarné par l'étude d'un matériau commun, le sédiment, qui constitue alors **un véritable document archéologique** (Petit, 2006).

Notre étude menée sur les dépôts de travertin préservés dans les structures archéologiques du site antique de Jebel Oust (Tunisie) s'inscrit parfaitement dans une telle approche. Cette étude est menée au sein de la mission franco-tunisienne de Jebel Oust, dirigée par A. Ben Abed (Institut National du Patrimoine, Tunis) et J. Scheid (Collège de France, Paris), dans laquelle interviennent des archéologues, des historiens, des spécialistes de l'architecture antique, des céramologues, des spécialistes de mosaïques antiques et des géologues, qui collaborent étroitement au cours des différentes missions sur le terrain.

Le site antique de Jebel Oust est établi sur le versant oriental de la montagne éponyme, à une trentaine de kilomètres au sud de Tunis, sur la route menant à Zaghouan. Le site comprend deux zones principales (Ben Abed et Scheid, 2003, 2005) : un ensemble de bâtiments construits autour de l'évent naturel d'une source chaude, et un réseau de trois citernes longeant le site au sud. L'exploitation de la source chaude débute dès le premier siècle de notre ère, avec l'installation d'un lieu de culte et d'un aqueduc alimentant un édifice thermal situé en contrebas du versant.

Les propriétés minérales de l'eau thermale exploitée la rendent susceptible de déposer des travertins dans les structures où elle circule, offrant alors un potentiel exceptionnel en tant qu'archives sédimentaires pour une étude géoarchéologique. Les travertins préservés sur le site antique de Jebel Oust sont l'élément central de la notion de *travertins anthropiques* que nous définirons au fil de notre exposé. La mise en œuvre d'une telle

démarche offre une opportunité de mettre en lumière une gestion complexe de l'eau au sein d'un site archéologique et de replacer l'exploitation de cette source thermale au sein du contexte « hydroarchéologique » du Nord de la Tunisie, entre le temple de Zaghouan et sa source associée, et l'aqueduc d'Hadrien alimentant la ville de Carthage. Plus généralement, notre étude s'intègre parfaitement dans une problématique plus générale de **gestion de l'eau** en Afrique du Nord à l'époque antique.

Notre démarche d'étude des *travertins anthropiques* du site antique de Jebel Oust.

Le manuscrit se décline en trois grandes parties. Le plan ainsi proposé peut, à première vue, surprendre le lecteur mais respecte convenablement les grandes étapes de notre approche géoarchéologique de *travertins anthropiques*, illustrée par l'exemple du site antique de Jebel Oust.

Une première partie (**partie A**) est consacrée à la définition de la notion de *travertins anthropiques*. Une première sous-partie traitera de la caractérisation géologique des travertins au sens large du terme qui nous verra explorer plusieurs aspects touchant à ces dépôts. Une première approche, essentiellement historique, nous fera voyager depuis les témoignages écrits des auteurs antiques jusqu'aux apports des sciences modernes pour terminer sur la définition scientifique actuelle des travertins. Les méthodes d'étude et les problématiques scientifiques liées aux travertins seront ensuite exposées, avant de révéler le potentiel paléoenvironnemental de ces dépôts. Le dernier chapitre de cette partie fait entrer en scène l'Homme et son empreinte dans les travertins. Une deuxième sous-partie traitera du rôle de l'eau dans la civilisation romaine. A travers un travail bibliographique, nous aborderons d'abord la place de l'eau dans les civilisations historiques, les aqueducs romains, la catégorie ambiguë des sanctuaires de source et de sanctuaire des eaux et les bains et les pratiques balnéaires dans l'Antiquité gréco-romaine.

A la suite de cette synthèse sur la place de l'eau dans l'archéologie romaine, **le cas spécifique des *travertins anthropiques*** est exposé dans une troisième sous-partie, avec la proposition d'une nouvelle définition et son illustration par la construction d'un premier inventaire de cas exemplaires. Enfin, une dernière sous-partie est consacrée à la mise en place d'une méthodologie propre aux *travertins anthropiques*, cheminant depuis un travail sur le terrain jusqu'aux analyses effectuées en laboratoire.

La seconde partie (**partie B**) constitue l'ossature de cette notion de *travertins anthropiques*, puisqu'elle est consacrée à l'étude géoarchéologique menée sur les travertins préservés sur le site de Jebel Oust. Dans un premier temps, le site archéologique sera replacé dans son environnement, pour définir le cadre archéologique et le cadre environnemental (géologique, hydrologique et climatique). Ensuite, la caractérisation des travertins de Jebel Oust sera exposée, en soulignant la transition entre les travertins naturels (c.-à-d. déposés avant l'exploitation humaine de la source chaude) et les travertins anthropiques dont la diversité sur le site antique sera détaillée. Puis nous aborderons l'analyse des travertins anthropiques préservés dans les différents secteurs du site, en commençant par la zone cultuelle située à l'aplomb de l'évent thermal qui nous verra aborder la complexité de la relation entre le sanctuaire et la source chaude associée. L'étude particulière des travertins

préservés dans les thermes antiques y succédera et nous verra discuter de plusieurs thèmes : la relation entre le faciès des travertins et la fonction des salles thermales, l'apport de l'analyse d'un travertin pour la chronologie relative, la lecture géoarchitecturale d'une salle, l'analyse microstratigraphique et son apport à la complexité de l'histoire d'une salle, et l'histoire du fonctionnement puis du dysfonctionnement d'un tuyau mise en lumière par les travertins. Enfin, l'analyse du contenu palynologique des travertins fournira des informations paléoenvironnementales de la région à l'époque antique. Une synthèse exposera les questions auxquelles l'étude géoarchéologique des travertins de Jebel Oust a répondu.

La troisième partie (**partie C**) proposera un certain nombre de perspectives d'une géoarchéologie des *travertins anthropiques*, en élargissant nos propos sur des sites qui offrent un potentiel similaire à celui de Jebel Oust. Nous exposerons à travers la notion de *travertins anthropiques* une certaine réflexion sur la gestion de l'eau par les sociétés humaines, en naviguant depuis des cas de gestion relativement simple jusqu'à des exemples de gestion plus complexe et en intégrant le degré d'impact anthropique.

Une synthèse générale de nos travaux de recherche sur les *travertins anthropiques* conclura le manuscrit, en appuyant sur l'intérêt d'étudier systématiquement ces archives sédimentaires de la « mémoire de l'eau » en contexte archéologique. Notre conclusion sera agrémentée d'un certain nombre de perspectives, d'une part méthodologiques pour perfectionner notre démarche géoarchéologique, et d'autre part géographiques pour accroître notre corpus, qui souligneront la poursuite nécessaire d'une telle démarche.

**PARTIE A - LES *TRAVERTINS ANTHROPIQUES* :
ÉTAT DE LA QUESTION ET NOUVELLE DÉFINITION.**

La première partie de ce manuscrit se décline en deux approches, l'une consacrée à une définition naturaliste (géologique) des termes travertins et tufs calcaires et des problématiques scientifiques associés, et une seconde abordant, dans une optique archéologique, historique et anthropologique, les relations entre l'Homme et l'eau dans les civilisations antiques, en insistant particulièrement sur l'existence de lieux de culte associés aux eaux et sur les constructions hydrauliques, tels que les aqueducs et les thermes. Ceci nous permettra ensuite d'introduire et de définir la notion de « travertins anthropiques », notion qui sera documentée par plusieurs exemples archéologiques. La mise en place d'une méthodologie et d'un protocole d'étude spécifiques à l'analyse de ces « travertins anthropiques » conclura l'ensemble.

A.I. LES TRAVERTINS ET TUF CALCAIRES : UNE DÉFINITION PROBLÉMATIQUE.

A.I.1. Les travertins et tufs calcaires : une nomenclature et une définition instables.

A.I.1.1. Une roche et un processus sédimentaire connus dès l'Antiquité.

A.I.1.1.1. Le témoignage des sources écrites antiques : une roche caractéristique et caractérisée.

« On voit aussi auprès de Hierapolis en Phrygie une grosse fontaine bouillante, qui dans les fossés qui font autour des jardins et des vignes où elle coule, engendre une croûte de pierre de chaque côté du fossé, que l'on en tire tous les ans, et dont on se sert pour faire les séparations des terres. »

Vitruve (I^{er} s. av. J.-C.)

A.I.1.1.1.1. La « Pierre de Tibur ».

Si la majorité des connaissances que nous possédons sur les travertins proviennent d'études scientifiques effectuées relativement récemment (c.-à-d. au cours du XX^e s.), nous savons que cette roche, et les processus sédimentaires auxquels elle est associée, étaient connus dès l'époque antique. Cette roche, travertin et tuf calcaire, a été largement exploitée durant l'Antiquité, pour ses qualités mécaniques et esthétiques, et l'est encore de nos jours.

Les témoignages des auteurs antiques permettent de nous renseigner sur les connaissances qu'avaient les Grecs et les Romains sur cette roche particulière, sur les processus sédimentaires associés à la formation de cette roche et sur son impact visuel dans le paysage.

Le travertin, connu sous le nom de *Lapis Tiburtinus* chez les Romains, littéralement « **Pierre de Tibur** », occupe une place particulière dans l'Antiquité romaine, comme en témoigne la remarque de Cicéron, rapportée par **Plin l'Ancien** (*Histoire Naturelle*, Livre XXXVI, 5), devant les habitants de l'île de Chios, en mer Egée (Grèce), lui faisant admirer les murs de leur ville :

« Les premiers marbres tachetés furent, je pense, trouvés dans les carrières de Chio ; les habitants les employèrent aux murs de leur ville, et ils s’attirèrent une plaisanterie de Cicéron ! Ils montraient à tout le monde ces murailles comme magnifiques : “ **J’admirerais bien plus, dit-il, que vous les eussiez faites en pierre de Tibur.**” Ce qu’il y a de certain, c’est que la peinture n’aurait pas été aussi honorée, ou plutôt ne l’aurait pas été du tout, si les marbres variés eussent été en vogue. »

Pline l’Ancien, *Histoire Naturelle* (XXXVI, 5).

Nous allons voir, à travers les différentes sources écrites laissées par les auteurs antiques, que le phénomène de pétrification et de concrétionnement était un phénomène parfaitement connu dans l’Antiquité et observé, et surtout décrit, dans plusieurs localités d’Italie et de Turquie. Ce fait a son importance puisque cette roche, si particulière, se forme ainsi **sous leurs yeux** et elle sera exploitée très largement pour la construction.

A.I.1.1.1.2. Un processus sédimentaire connu et décrit, dans la nature jusque dans la poésie.

Dans la nature...

Le phénomène de pétrification, de formation de concrétions, est déjà connu dès l’Antiquité, comme en témoignent certains récits des auteurs antiques. **Vitruve** (I^{er} s. av. J.-C.) décrit parfaitement ce phénomène, prenant le cas d’un lac de Cappadoce, une région d’Asie mineur située dans l’actuelle Turquie, dans lequel, si l’on y trempe un roseau, la partie immergée de celui-ci se retrouvera encroûtée :

« *Etiamque est in Cappadocia in itinere, quod est inter Mazaca et Tuana, lacus amplius, in quem lacum pars sive harundinis sive alii generis si demissa fuerit, et postero die exempta, ea pars, quae fuerit exempta, invenitur lapidea, quae autem pars extra aquam manserit, permanet in sua proprietate.* »

« **Il y a encore en Cappadoce, [...], un très grand lac qui a cette propriété, que si l’on y met tremper une canne ou une autre chose, on la trouve le lendemain, quand on la tire, pétrifiée par la partie qui a été dans l’eau, celle qui était dehors étant demeurée en son état naturel.** »

Vitruve, *De Architectura* (Livre VIII, III, 9).

Vitruve signale également les travertins générés par la source chaude et bouillonnante de *Hiérapolis*, en Phrygie, région de l’actuelle Turquie. Il s’agit de l’actuel site de Pamukkale, célèbre pour ses sources chaudes et ses dépôts de travertin associés. Vitruve nous apprend que la source dépose, au bout d’un an, une croûte de pierre dans les fossés entourant les jardins et vignes, et que cette croûte est enlevée chaque année pour servir à l’édification de clôtures dans les champs :

« **On voit aussi auprès de Hierapolis en Phrygie une grosse fontaine bouillante, qui dans les fossés qui font autour des jardins et des vignes où elle coule, engendre une croûte de pierre de chaque côté du fossé, que l’on en tire tous les ans, et dont on se sert pour faire les séparations des terres.** »

Le philosophe **Sénèque** (I^{er} s. apr. J.-C.) mentionne également ce phénomène de pétrification qu'il décrit en prenant l'exemple d'un fleuve dans le territoire des Cicones (Asie mineure) et en citant le poète Ovide :

« Le fleuve dont parle Ovide, [...], a une eau minérale ; le limon qu'elle contient cimente et durcit les corps. Le sable de Pouzzoles se charge en pierre au contact de l'eau, mais l'eau de ce fleuve, si elle touche une matière solide, s'y attache et s'y fixe. Aussi tout objet jeté dans son lit est-il, tôt après, retiré à l'état de pierre. »

Sénèque, *Questions Naturelles* (III, 20).

Puis Sénèque décrit ce même phénomène observé dans quelques régions d'Italie :

« Même phénomène dans quelques endroits d'Italie : a-t-on plongé dans l'eau une baguette, un rameau feuillu, on repêche une pierre quelques jours plus tard. Le limon se dépose en effet tout autour de l'objet et s'y agglomère peu à peu. »

Sénèque, *Questions Naturelles* (III, 20).

Enfin, Sénèque cite encore l'exemple des eaux sulfureuses, particulièrement celles de la source d'*Acque Albule* (Tivoli, Italie) :

« La chose te paraîtra moins surprenante, si tu observes que l'Albula et en général toutes les eaux sulfureuses encroûtent d'une matière solide leur lit et leurs canaux. »

Sénèque, *Questions Naturelles* (III, 20).

Et il compare certaines pierres qu'il observe, poreuses et perméables, aux concrétions que peut parfois former l'eau aux abords de « sources médicinales » :

« Les pierres même qu'on peut y trouver sont poreuses et perméables, pareilles aux concrétions que l'eau forme en se durcissant, surtout aux bords des sources, médicinales, où les immondices des eaux sont rapprochées et consolidées par l'écume. »

Sénèque, *Questions Naturelles* (III, 25).

...jusque dans la poésie :

Le poète latin **Ovide** (43 av. J.-C. /17 apr. J.-C.) mentionne dans son long poème « Les Métamorphoses », le phénomène de pétrification observé dans un fleuve dans le territoire des Cicones :

*« flumen habit Cicones, quod potum saxea reddit Viscera,
quod tactis inducit marmora rebus. »*

**« Le fleuve des Cicones, qui pétrifie les entrailles
et revêt de marbre les objets qu'il touche. »**

Ovide, *Les métamorphoses* (XV, 313-314).

Sur l'île de Chios (Grèce), Vitruve (VIII, 22) nous raconte qu'il existait une fontaine dont l'eau était agréable à boire mais dont une légende disait qu'elle changeait l'âme et le cœur de celui qui en boit en rocher :

« Item est in insula Cia fons, e quo qui imprudentes biberint, fiunt insipientes, et ibi est epigramma insculptum ea sententia : iucundam eam esse potionem fontis eius, sed qui biberit, saxeos habiturum sensus. »

« L'île de Chio possède de même une fontaine dont les eaux font perdre la raison à ceux qui en boivent imprudemment; on y lit aussi une inscription qui signifie que ses eaux sont agréables à boire, mais que celui qui en boit aura le cœur dur comme un rocher. »

Vitruve, *De Architectura* (Livre VIII, 3).

Et Vitruve rapporte l'épigramme inscrite sur cette même fontaine et relatant une légende bien particulière :

*« Ἦδεῖτα ψυχροῦ πόματος λιβάς, ἥν ἀνίσσι
Πηγῇ, ἀλλὰ νόῳ πέτρος ὁ τῆσδε πιών. »*

**« Il est agréable de boire les eaux fraîches que répand cette fontaine ;
mais elles changent en rocher le cœur de celui qui en boit. »**

Vitruve, *De Architectura* (Livre VIII, 3).

Nous discernons dans ces quelques vers une métaphore du phénomène de pétrification qui caractérise certaines sources et certaines eaux. En parallèle de la traduction d'une eau impropre à la consommation (et pouvant entraîner une « maladie du cœur »), il peut s'agir ici d'une véritable symbolisation du phénomène naturel de concrétionnement et de formation de travertin ou de tuf calcaire.

A.I.1.1.3. Une roche qui dessine le paysage.

Le géographe grec **Strabon** (58 av. J.-C. / 21 apr. J.-C.) apporte un témoignage considérable de la vision des Anciens. Au même titre que Vitruve, il décrit les dépôts de travertins du site de Pamukkale / *Hiérapolis* (Turquie) qui se forment dans les rigoles creusés par les habitants de la région et qui finissent par édifier de véritables clôtures :

« L'eau de ces sources, en effet, a une telle disposition à se solidifier, à se changer en une espèce de concrétion pierreuse, que le habitants du pays n'ont qu'à la dériver dans de petites rigoles [pratiquées autour de leurs propriétés] pour obtenir des clôtures qui semblent faites d'une seule pierre. »

Strabon, *Géographie* (XIII, 4).

Et, surtout, Strabon décrit la géométrie des dépôts sédimentaires en mentionnant les bassins se formant naturellement à l'émergence de la source chaude :

« L'eau est d'ailleurs si abondante qu'on rencontre à chaque pas, dans *Hiérapolis*, des bassins ou bains naturels. »

Strabon, *Géographie* (XIII, 4).

Les structures dont Strabon parle dans ce texte sont les célèbres bassins naturels d'eau chaude qui se forment dans le massif de travertin du site de Pamukkale, très fréquentés et très visités aujourd'hui (Fig A.1). On apprend que cette eau pétrifiante, parmi ses nombreuses qualités et vertus, possède la qualité de fixer les teintures des laines produites dans la région. Strabon assure également que les rivières du territoire de Laodicée possèdent cette même qualité de pétrification ou d'incrustation (*Géographie*, XIII, 4). D'autre part, il semble évident, même si les preuves écrites manquent, que ces dépôts ne pouvaient être négligés par les Romains, dont certains aqueducs et autres canalisations ou structure à fonction hydraulique s'emplissaient de ces concrétions calcaires.



Figure A.1.
Les bassins en travertin du site
de Pamukkale (Turquie).
photo Creative Commons

A.I.1.1.1.4. Une roche particulière, utilisée dans la construction.

Dans son *Histoire Naturelle*, Pline l'Ancien fait remarquer que la pierre de Tivoli supporte toute contrainte mécanique, sauf si elle est exposée à une forte chaleur, susceptible de la faire éclater :

« Ceux de Tibur, résistants par ailleurs, se fendent à la chaleur. »

Pline l'Ancien, *Histoire Naturelle* Livre XXXVI, 5).

Vitruve note également le caractère dur et résistant de cette pierre, mais son témoignage rejoint celui de Pline l'Ancien au sujet de son exposition à une forte chaleur :

«*Tiburina vero, et quae eodem genere sunt omnia, sufferunt et ab oneribus et a tempestatibus iniurias, sed ab igni non possunt esse tuta, simulque sunt ab eo tacta, dissilunt et dissipantur, ideo quod temperatura naturalii parvo sunt humore, item quod non multum habent terreni, sed aeris plurimum et ignis*»

« Les pierres de Tibur et toutes celles qui leur ressemblent résisteront bien à un poids considérable et aux injures de l'air ; mais elles ne sont pas à l'épreuve du feu, qui ne les a pas plutôt touchées qu'elles éclatent et se brisent par morceaux, parce que dans leur composition naturelle il entre peu d'eau, peu de terre avec beaucoup d'air et de feu ».

Vitruve, *De Architectura* (Livre II, 7).

Le philosophe grec **Theophraste** (ca. 371-287 av. J.-C.), qui dirigea pendant un certain temps l'école péripatéticienne d'Athènes fondée par Aristote, utilise le terme *poros* (πόρος) pour désigner une pierre que l'on trouve en Egypte et qui possède l'aspect du marbre de Paros mais la légèreté du tuf (*Le Livre des Pierres*, 14) et qui est utilisé pour la construction de bâtiments.

« On y trouve aussi le *porus*, qui pour la couleur et la dureté ressemble au marbre de Paros, mais a la légèreté du tuf ; c'est pour cela que dans leurs demeures les plus soignées les Egyptiens s'en servant comme cloison. »

La pierre qu'il décrit alors pourrait être en fait du travertin tel qu'on le connaît et définit actuellement (Caley et Richards, 1956). Son aspect et sa couleur sont semblables au célèbre marbre de Paros, mais sa densité le rapprochent d'avantage des pierres légères, tels que le tuf. Nous avons bien là les caractéristiques physiques d'un travertin.

Enfin, l'agronome romain **Palladius** (IV^e s. de notre ère) conseille l'utilisation du travertin pour la fabrication de la chaux :

« Pour faire de la chaux, on cuira de la pierre de Tibur. »

Palladius, *De Re Rustica* (I, 10).

Conclusion sur l'apport des sources antiques :

Les sources écrites laissées par les auteurs antiques apportent un témoignage sérieux et cohérent des connaissances que possédaient les Anciens du *Lapis tiburtinus*, cette « Pierre de Tibur », et, surtout, du processus sédimentaire à l'origine de cette roche qui est générée par la précipitation calcaire de certaines eaux. En outre, ces sources écrites attestent de la formidable exploitation, notamment dans la construction, de ce matériau si particulier, mais également de l'intérêt porté aux propriétés mécaniques de ces roches, en particulier leur résistance à une forte chaleur.

A.I.1.1.2. L'essor apporté par les sciences modernes.

« Les travertins, et surtout le problème de leur interprétation ont particulièrement retenu l'attention des auteurs depuis le siècle dernier. »

J. Casanova (1981)

Après la chute de l'Empire romain, les sources écrites mentionnant les travertins et tufs calcaires semblent se raréfier. Les termes restent tout de même connus dans certaines régions d'Europe, particulièrement en Allemagne, au VIII^e s. de notre ère (Pentecost, 2005, p. 7). Les sources écrites médiévales sont également rares. Le savant allemand Agricola (1546, *in* Pentecost, 2005, p. 7) mentionne ces types de dépôts en tant que *tofus* et en fait une très brève description. A cette époque, les sources pétrifiantes deviennent de véritables curiosités en Europe et bénéficient de travaux de la part de savants, tel que l'alchimiste allemand Libavius (1597, *in* Pentecost, 2005, p. 7). Mais ces travaux ne concernent seulement que les supposées propriétés médicinales d'une source chaude, et ignorent souvent les dépôts sédimentaires, calcaires ou siliceux, associés à ces eaux. Il fallut attendre les travaux de Lavoisier (1780-90) et Cuvier (1812) pour commencer à comprendre les réactions physico-chimiques et biologiques à l'origine de la précipitation carbonatée (Pentecost, 2005, p. 8). L'étude des travertins connut un large essor grâce aux travaux, essentiellement descriptifs, de Leopold von Buch (1774-1853), un géologue allemand qui profita d'un voyage en Italie pour étudier les dépôts de travertins se formant à Tivoli (Latium, Italie). Ces travaux sont très vite suivis par ceux de Charles Lyell (1792-1875) qui, parallèlement à ces études sur les dépôts du site de Tivoli et sur ceux de Toscane, examine quelques travertins en Angleterre et effectuent ainsi certaines comparaisons morphologiques et sédimentologiques. Mais c'est Raspail (1833, *in* Pentecost, 2005, p. 8) qui fut le premier à découvrir le rôle éventuel de l'activité biologique des plantes dans la précipitation carbonatée. Après un certain ralentissement dans ces avancées scientifiques, Johnston (1915, *in* Pentecost, 2005, p. 8) standardisa l'équation de précipitation des carbonates et établit la relation entre les dépôts de carbonates et la pression partielle de CO₂ de l'eau. Suite à ces travaux, Julius Pia (1933, 1934, *in* Pentecost, 2005, p. 8-9) propose huit théories expliquant la précipitation carbonatée, dont celle de « la perte d'eau » engendrée par les plantes et entraînant une augmentation de la concentration en bicarbonates dans l'eau, et celle de la « perte en dioxyde de carbone » provoquée par l'activité photosynthétique des végétaux. Au cours des cinquante dernières années, parallèlement aux progrès des techniques d'analyse, nos connaissances sur les travertins et tufs calcaires ont rapidement progressé et de nombreux articles scientifiques sont venir enrichir la littérature des sciences naturelles et environnemenales.

A.I.1.2. La définition actuelle.

« Purely descriptive definitions, irrespective of their origin, may be so broad as to have little value »

A. Pentecost (2005)

Les dépôts carbonatés continentaux que sont les travertins et les tufs calcaires affichent une certaine diversité quant à leur définition, leur environnement et condition de dépôt, leur morphologie, leur géométrie et leur sé-

dimentologie de faciès. Une brève définition des travertins et des tufs calcaires est fournie par Mitchell (1985) lorsqu'il décrit des dépôts formés par évaporation d'une eau de source ou de rivière. Fouke *et al.* (2000) proposent également une définition très large englobant tous les carbonates non-marins qui précipitent à proximité de sources, rivières, lacs ou grottes.

Classés parmi les formations superficielles du domaine karstique en relation avec un substrat calcaire (Campy et Macaire, 2003), les travertins et tufs calcaires ont fait l'objet de nombreuses publications scientifiques au cours des dernières décennies, engendrant une diversité dans leur définition, dénomination ou appellation. Parmi les carbonates continentaux, les travertins et tufs sont généralement définis comme des dépôts de source (Pomerol *et al.*, 2005), mais peuvent également définir les dépôts de rivières ou de cours d'eau peu profonds et à petites cascades, où ils se forment par précipitation des carbonates activée par les turbulences et une perte en CO₂ (Foucault et Raoult, 1985). Le terme tuf devient tout de même ambigu puisqu'il peut également désigner une roche volcanique (le tuf volcanique) formée par accumulation de projections volcaniques (Foucault et Raoul, 1985), correspondant au *tufa*, bien connu dans certaines régions italiennes. C'est pourquoi l'adjectif « calcaire » est généralement ajouté au terme « tuf » pour désigner les dépôts carbonatés de source ou de rivière (*calcaerous tufas*). Ainsi, plus généralement, travertins et tufs calcaires sont des formations sédimentaires issues de la précipitation de carbonates dissous dans les eaux continentales.

Les critères séparant les travertins des tufs calcaires sont encore flous dans la littérature, et **trouver une définition précise de chacun des deux termes, souvent utilisés conjointement, reste compliqué**. Une certaine confusion entre les différents termes définissant ces dépôts carbonatés continentaux règne depuis des dizaines d'années, comme le faisait déjà remarquer Fénelon (1968).

Une première distinction par Vaudour (1981) sépare les tufs, formations de type poreux, vacuolaire, cohérent mais tendre et d'aspect détritique, contrairement aux travertins, qui présentent des faciès indurées et compacts. En reprenant et en simplifiant ce discours, les travertins sont des roches dures et cohérentes tandis que les tufs sont tendres et poreux.

Certains auteurs vont s'appuyer sur la température de l'eau de précipitation, d'autres sur les contextes et les processus hydrologiques et géologiques et/ou sur les processus de formation. Riding (1991) est un des premiers à faire intervenir la température de l'eau de précipitation pour définir les travertins et classe ceux-ci parmi les formes de carbonates d'origine microbienne, tandis que Glover et Robertson (2003) définissent simplement les travertins comme des dépôts d'eau chaude ($t > 20^{\circ}\text{C}$).

De récentes études ont montré que ces concrétions carbonatées peuvent être classées en fonction de leur environnement de dépôt (Ford et Pedley, 1992 ; Pentecost, 1995). Les travertins sont des dépôts liés à une activité hydrothermale, à l'inverse des tufs calcaires qui proviennent, eux, d'eaux douces (source ou rivière) où vont précipiter les carbonates en équilibre avec les températures de surface ambiantes. Ces différents environnements de dépôt vont engendrer des caractères pétrographiques et des signatures géochimiques différentes entre les deux types. Cette différenciation est reprise par Gandin et Capezzuoli (2008), qui proposent une

confrontation entre tufs calcaires et travertins basée sur les caractéristiques pétrographiques et géochimiques, et sur les caractères génétiques de ces dépôts.

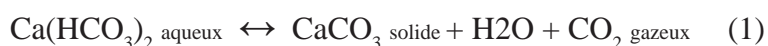
Parallèlement à cette nomenclature, certains travaux concernant les dépôts carbonatés continentaux regroupent sous l'appellation travertin un certain nombre de types de roches carbonatées continentales. C'est le cas de la publication de Pentecost (2005) qui regroupe, sous le même terme travertin, l'ensemble des dépôts carbonatés continentaux précipitant autour d'une source, le long des ruisseaux et des rivières, et occasionnellement dans certains lacs. En premier lieu, cet auteur classe les travertins en fonction de la charge et l'origine du CO_2 dissous dans l'eau de précipitation et distingue ainsi les « travertins météogènes » et les « travertins thermogènes ». Sont inclus également les dépôts endokarsiques, c.-à-d. les spéléothèmes*, que l'auteur définit en tant que « *hypogean travertine* ». Etant données les relations existant entre le milieu karstique et les travertins, ces derniers et les concrétions de grotte peuvent être intégrés dans une même chaîne de redistribution du carbonate de calcium mis en solution dans les massifs karstiques. Il est alors possible d'envisager les concrétions de grotte comme des formations carbonatées internes, et les travertins comme des formations carbonatées externes.

Enfin, et plus généralement mais certainement d'une manière scientifiquement inexacte, les travertins peuvent être assimilés aux autres constructions carbonatées d'origine biologique (p. ex. les récifs coralliens) et être ainsi considérés comme des biohermes continentaux (Riser, 1999).

Dans notre étude, la distinction entre les travertins, correspondant à des dépôts de source chaude, et les tufs calcaires, dépôts carbonatés dont la précipitation se fait à partir d'une eau douce et en contact direct avec l'air ambiant, sera préservée. Cependant, **afin de simplifier et clarifier l'écriture de ce manuscrit et de notre discours, il sera utilisé ici le terme travertins s.l. (c.-à-d. travertins au sens large du terme) pour désigner conjointement les travertins et tufs calcaires. Lorsque nous devrons séparer les deux types de dépôts, chacun des termes sera employé distinctement.**

A.I.1.3. Les processus de dépôt des travertins s.l.

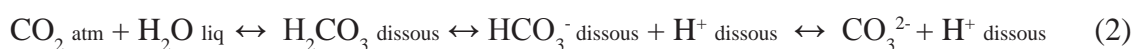
Les processus responsables du dépôt de travertins s.l. ont pu être mis en évidence par un certain nombre d'études de cas et restent néanmoins sujets à discussion, qu'une synthèse a pu caractériser (Pentecost, 2005, p. 197-242). Dans un contexte calcaire, les roches, dont la composition géochimique est dominée par le carbonate de calcium (CaCO_3), présentent une grande solubilité par les eaux riches en gaz carbonique (CO_2) qui, selon des temps de résidence mesurés en mois ou en années, lessivent les roches calcaires et assimilent des minéraux calcaires sous forme de bicarbonates ($(\text{HCO}_3)_2\text{Ca}$). Dans ce système gaz carbonique-eau-carbonates, la précipitation du carbonate de calcium (CaCO_3) est la conséquence d'une modification des paramètres physiques, physico-chimiques et/ou biologiques des eaux, entraînant une rupture des équilibres calco-carboniques. Cette précipitation est traduite par l'équation (1) :



La mise en place de dépôts de travertins est donc la conséquence du déséquilibre du système $\text{CaCO}_3\text{-H}_2\text{O-CO}_2$ sous l'influence de trois types de processus : physico-chimique, physique et biologique. Les précipitations d'origine strictement chimique semblant rares (Campy et Macaire, 1989).

- processus physico-chimiques :

Ils sont souvent considérés comme étant le facteur déterminant car les trois phases du système du carbonate de calcium vont intervenir (Andreo *et al.*, 1999) : solide (carbonate), liquide (eau) et gazeuse (gaz carbonique). Cette théorie physico-chimique traduit une précipitation inorganique à partir d'une eau sursaturée en carbonates. La solubilité des carbonates se définit à travers différents paramètres dont les principaux sont la concentration de l'eau en ion HCO_3^- , le pH (ou concentration en ions hydrogènes) et la pression de CO_2 , tous interdépendants et directement liés aux échanges entre gaz carbonique atmosphérique et gaz carbonique dissous dans l'eau :



Toutefois, interviennent également dans l'équilibre (2) la température ainsi que la concentration en différents ions autres (force ionique de la solution). A partir de ces paramètres, il est alors possible de calculer un pH de saturation (théorique) pour lequel l'équilibre peut être maintenu. Ce pH de saturation, s'il est comparé au pH réel mesuré sur le terrain, permet de définir un indice de saturation ($\text{dPH} = \text{pH mesuré} - \text{pH desaturation}$). Un indice de saturation positif indique que la solution est sursaturée en ions calcium, entraînant la précipitation de la calcite. A l'inverse, un indice négatif reflète une sous-saturation (Casanova, 1981 ; Andreo *et al.*, 1999). Il faut cependant noter que la concentration en ions calcium regroupe les sels de calcite, de dolomite et de gypse. Une solution peut donc être saturée vis-à-vis de la calcite mais non saturée vis-à-vis de la dolomite ou du gypse, continuant ainsi à dissoudre des minéraux calciques et engendrant ainsi une augmentation de la concentration en calcium ; celui-ci précipite sous forme de calcite, sel le moins soluble.

- processus physiques :

Certains processus physiques favorisent également une précipitation du carbonate de calcium, comme une agitation de l'eau ou une variation de la cinétique de l'eau. Tant que l'eau reste en profondeur, le CO_2 dissous est suffisant pour maintenir les carbonates sous forme de bicarbonates solubles et éviter leur précipitation. Mais lorsque l'eau émerge, elle subit une perte de CO_2 par dégazage, l'équilibre de la réaction (1) est alors déplacé et le carbonate de calcium précipite.

- processus biologiques :

De nombreuses études ont mis en évidence le rôle important des processus biologiques ou biochimiques dans la formation des travertins (Adolphe, 1981 ; Casanova, 1981, 1986 ; Campy et Macaire, 1989). Le moteur fondamental du processus biochimique est la photosynthèse, qu'elle soit oxygénique pour les végétaux

(plantes, mousses et algues) ou anoxygénique pour les bactéries (Casanova, 1981). Une activité algaire ou algo-bactérienne va utiliser le CO_2 dissous pour effectuer la photosynthèse et ainsi induire une précipitation des carbonates. Celle-ci apparaît également à la faveur d'organismes qui prélèvent et fixent directement CaCO_3 ou de micro-organismes qui détruisent les composés organiques ayant préalablement mobilisé CaCO_3 . Ces processus biologiques entraînant la précipitation de carbonates nécessitent des conditions écologiques adéquates à l'installation d'un biotope riche en espèces absorbant le CO_2 . Les processus biologiques ou biochimiques sont à l'origine de la formation de faciès stromatolithiques ; depuis quelques années seulement les travertins sont considérés comme appartenant aux stromatolithes* (Freytet et Verrecchia, 1998).

L'origine des stromatolithes est le plus souvent algaire et même due essentiellement à des algues bleues appelées *cyanophycées** associées à des bactéries. Les algues (pro- et eucaryotes) n'existent jamais toutes seules et se trouvent toujours associées avec des bactéries, probablement aussi avec des champignons, et d'autres organismes (Freytet et Verrecchia, 1998). L'activité de coenoses de cyanobactéries déclenche donc, par des phénomènes biologiques, une précipitation carbonatée sous la forme d'un encroûtement stromatolithique. L'intérêt de l'étude des stromatolithes est souligné par J. Casanova (1981) lorsqu'il dit que « le stromatolite réagit activement aux contraintes de l'environnement et donc renferme des données sur le paléomilieu ». Dans ce type d'encroûtement, c'est le tapis algo-bactérien, élément de base de la précipitation du carbonate de calcium, qui contrôle la structure. La production carbonatée n'est ni piégée, ni disposée au hasard dans ce tapis algaire, mais orientée autour des filaments. Deux espèces sont dominantes dans ces polycoenoses : *Rivularia haematites* et *Phormidium incrustatum*. La production carbonatée de *Phormidium incrustatum* est le plus souvent composée de grains micritiques et la croissance du tapis algaire s'exerce de façon colonnaire, alors que dans la production de *Rivularia haematites*, les germes de cristallisation sont plus rares et développent surtout des cristaux lamellaires qui, par empilement et croissance latérale donnent des structures en éventail. Le milieu travertineux est ainsi défini comme un milieu stromatolithique continental et correspond à un biotope résultant d'une succession de processus physico-chimiques ou biologiques. Les stromatolithes résultent de la calcification rapide d'organismes biologiques d'une grande diversité et ont donc une structure et un développement complexes.

A.I.2. Les méthodes d'étude et les problématiques scientifiques.

A.I.2.1 Caractérisation sédimentaire.

A.I.2.1.1. Morphologie et géométrie des dépôts.

« Compact rocks are seen descending the slanting sides of hills, very much in the manner of lava-currents, except that they are of a white colour, and terminate abruptly when they reach the course of a river.»

C. Lyell (1830)

Les travertins *s.l.* présentent une certaine diversité quant à leur géométrie et leur morphologie, en fonction

de la topographie, la géomorphologie et l'environnement de dépôt. Plusieurs grandes tentatives de classifications en fonction de la morphologie et de la géométrie des dépôts, plus ou moins simplistes ou plus ou moins précises, sont proposées dans la littérature (p. ex. Campy et Macaire, 1989 ; Pentecost, 2005 ; Pedley, 2009), principalement obtenues par des observations sur le terrain. La plupart de ces classifications ne prenant pas en compte la distinction entre travertins et tufs calcaires, nous ferons ici la différence concernant ces deux types de dépôts pour exprimer leurs différentes morphologies et géométries.

A.1.2.1.1.1. Les travertins.

Les travertins, dépôts issus de sources chaudes, sont majoritairement localisés dans les régions caractérisées par une géodynamique intense (Fig. A.2), permettant les manifestations de sources chaudes à la surface de la Terre. C'est le cas par exemple des travertins du Massif central (France), des travertins de la zone volcanique de l'Italie Centrale (Sud de la Toscane et *Latium*), et des travertins localisés dans le contexte dynamique Egéen (Grèce orientale et Turquie occidentale).

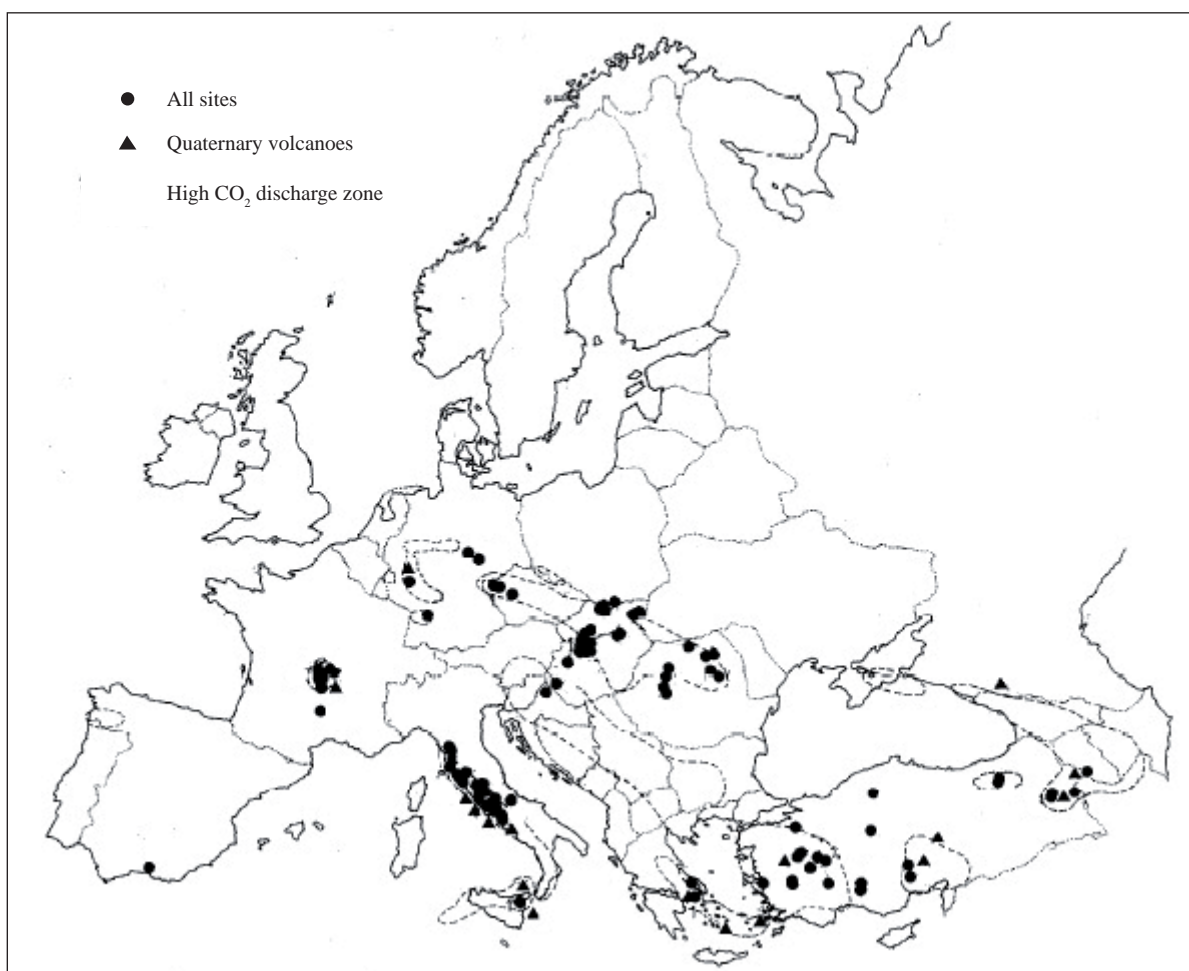


Figure A.2. Répartition des travertins en Europe et Asie Mineure (Pentecost, 1995).

Les travertins présentent une certaine variété dans leur morphologie, depuis la source qui les génère jusqu'à leur développement en aval. A partir de dépôts situés en Italie et aux Etats-Unis, Chafetz et Folk (1984) ont construit une classification des travertins en proposant cinq modèles selon la morphologie des dépôts. Ces modèles sont par la suite retrouvés dans l'étude de Pedley (2009) sur les travertins de la région méditerranéenne, ainsi que dans un recensement général des travertins dans le monde (Ford et Pedley, 1992) et dans les travaux de Pentecost (1995) sur des travertins d'Europe et d'Asie mineure. Une classification cohérente des travertins est également proposée par l'étude du dépôt du site de *Rapolano Terme* (Toscane, Italie) daté du Pléistocène supérieur (Guo et Riding, 1998), à laquelle est adjointe une association de faciès pour chaque morphologie de dépôt (Guo et Riding, 1999).

Pentecost et Viles (1994) et Pentecost (2005) proposent de classer les travertins *s.l.*, en parallèle des différents modèles de dépôt, en deux grands types : les travertins autochtones (c.-à.-d. formés *in situ*) et les travertins allochtones (formations distales*, p. ex. les dépôts de remblaiement de vallée, de remplissage en amont de barrage, de cônes alluviaux). Si cette classification est intéressante d'un point de vue géomorphologique et de dynamique sédimentaire, elle a cependant la faiblesse de ne pas faire la distinction entre les travertins *stricto sensu* (dépôts issus d'une source chaude) et les tufs calcaires (dépôts issus d'une source froide).

Ainsi, afin de synthétiser l'ensemble de ces études, plusieurs modèles de dépôt sont à retenir pour classer les différentes morphologies des travertins.

- **Le modèle de dépôt en dôme (*mound depositional system*) :**

Ce modèle présente des dépôts très localisés de travertins en forme de dôme, d'une hauteur pouvant varier de 1 à 100 m, et qui se développent autour de l'évent même de la source thermique. Ce modèle est toujours associé à un type principal de faciès : le *reed mound facies*, défini par Guo et Riding (1998), qui présente des complexes d'unités lenticulaires limitées par des surfaces convexes dont la pente peut atteindre une valeur maximale de 35°. Ce système en dôme se construit par addition successive de lamines associées à des micro-lobes (= terrassettes). La succession de lamine présente un aspect de pseudo-rides dont l'origine est le développement de micro-gours sur la surface d'accrétion.

Le modèle en dôme est celui qui définit deux exemples de travertins en Italie centrale, celui du site d'*Acqua Borra* (fig. A.3) et celui qui se forme autour de la source actuelle de *Bullicame* (fig. A.4).

- **Le modèle de dépôt de ride (*fissure ridge model*) :**

Le modèle de dépôt en ride se développe communément le long de ligne de failles, de fractures ou de fissures, linéaires ou courbes, avec une certaine symétrie dans la morphologie du dépôt de part et d'autre de la fissure (Fig. A.5). Le travertin se développe, dans ce modèle, par accumulation de fines lamines de précipitation carbonatée accompagnée d'une formation éventuelle de micro-gours (Fig. A.6), qui donnent un aspect pseudo-



Figure A.3. Carrière dans le travertin en dôme (mound depositional system) du site d'Acqua Borra (Toscane, Italie).



Figure A.4. Source chaude de Bullicame (Latium, Italie) et dépôt de travertin en dôme.

ridé, en vue transversale, aux dépôts (Fig. A.7). Des exemples illustrant ce type de modèle peuvent être trouvés dans les travertins de *Bagni di Tivoli* et de *Rapolano Terme* (Italie) et dans certains endroits des travertins de *Pamukkale* (Turquie). D'anciens dépôts suivant ce modèle offrent dans leur stratigraphie des hiatus associés à la formation de paléosols ou d'horizons détritiques, comme c'est le cas à *Bagni di Tivoli* (Italie).



Figure A.5. Modèle de dépôt de ride (fissure ridge travertine), travertin de Rapolano Terme (Toscane, Italie).



Figure A.6. Micro-gour au sein du travertin de Rapolano Terme (Toscane, Italie).



Figure A.7. Section transversale du dépôt de travertin de Rapolano Terme (Toscane, Italie).

• **Le modèle de dépôt de pente (*slope depositional system*) :**

Le modèle de dépôt de pente, qui, comme l'indique son nom, se met en place sur des surfaces topographiques présentant un certain pendage, est constitué, en fait, de trois sous-modèles, qui sont :

- **le modèle de morphologie en terrasse (*terrace slope deposits*)** : ce modèle se compose de petits bassins courbes formant des macro-terrasses (de quelques mètres de circonférence) jusqu'à des micro-terrasses (centimétriques) subhorizontales, et d'un « mur » de carbonates séparant chaque terrasse. Ces murs (*terrace walls*, Guo et Riding, 1998) peuvent atteindre une hauteur variant de quelques centimètres à deux mètres, tandis que les bassins (*terrace pools*, Guo et Riding, 1998) peuvent avoir une taille comprise entre quelques décimètres et quelques mètres alors que leur profondeur originelle est généralement plus petite que leur propre largeur. Ce modèle peut se développer à partir d'une surface quasi-horizontale, c'est-à-dire qu'il n'est pas nécessaire d'avoir une forme en escalier à la base de ce modèle. La formation progressive de ces terrasses est fonction de la turbulence de l'écoulement d'eau, de la vitesse de cet écoulement ainsi que de la rugosité de la surface. C'est ce modèle que Strabon décrit dans sa *Géographie* (cf. A.I.1.1.1.3) concernant le site de *Hiérapolis*/Pamukkale, et qui définit également le travertin de *Bagni San Filippo* (Toscane, Italie) (Fig. A.8 et A.9).



Figure A.8. Modèle de morphologie en terrasse (*terrace slope deposits*), travertin de Bagni San Filippo (Toscane, Italie). L'échelle est donnée par le baigneur (1,50 m) au premier plan.



Figure A.9. Détail du travertin de Bagni San Filippo : « terrace walls » et « terrace pools ».

- **le modèle à faciès de pente douce (*smooth slope facies*)** : contrairement au précédent, ce modèle ne présente pas une morphologie de dépôts en terrasses mais les dépôts vont présenter des faciès similaires au modèle de morphologie en terrasses. La différence de morphologie vient du fait que les pentes douces vont présenter une moindre surface de rugosité et un flux d'eau moins important.

- **le modèle en cascade** : plus rare que les deux modèles précédents, ce modèle consiste en des encroûtements dus à une chute d'eau provoquée par une surface verticale à sub-verticale (p. ex. une surface d'accrétion formée à la suite de l'érosion de dépôts antérieurs). C'est le modèle de dépôt des travertins de la région de Korbous (Cap Bon, Tunisie) qui se développent à partir d'une source chaude qui vient se jeter directement dans la mer Méditerranée (Fig. A.10). Il présente une morphologie en cône plus ou moins épais, constitué de lamines carbonatées qui forment des micro-terrasses.



Figure A.10. Travertin de cascade dans la région de Korbous (Cap Bon, Tunisie).

• **Le modèle de dépôt de dépressions (*depression depositional system*) :**

Le modèle de dépôt de dépressions comprend l'ensemble des dépôts occupant des surfaces planes, ou des aires de faible pente topographique, ainsi que les creux. Les travertins se développent dans un environnement de dépôt de lac peu profond ou de piscine et présente un faciès à litages fins. Ces dépôts peuvent atteindre plusieurs mètres de puissance et s'étendre latéralement sur une dizaine à une centaine de mètres.

A.1.2.1.1.2. Les tufs calcaires.

Les tufs calcaires, contrairement aux travertins *s.s.* dont la répartition est principalement limitée aux régions géodynamiquement très actives, connaissent une répartition ubiquiste à la surface terrestre (Fig. A.11), puisqu'ils sont susceptibles de se développer dans toute région à substrat calcaire, offrant une répartition géographique très large.

Plusieurs classifications des tufs calcaires en fonction de la morphologie des dépôts ont été proposées, comme celle de Freytet (1990) concernant les tufs du Nord de la France, ou celle de Fabre (1986) pour des tufs du Sud-Est de la France¹. Plus généralement, Ford et Pedley (1992), dans un recensement des dépôts de tufs calcaires

¹Il est intéressant de noter que l'auteur (Fabre, 1986) définit dans sa typologie un « travertin d'origine anthropique » pour désigner des tufs déposés au sein des constructions humaines.

à travers le monde, propose une classification exhaustive des morphologies de dépôt, classification synthétisée ensuite par Pedley (2009) sur les dépôts de la région méditerranéenne. De plus, dans leur nomenclature sur les travertins au sens large, au même titre que pour les travertins *s.s.*, Pentecost et Viles (1994), repris par Pentecost (2005), proposent de classer les tufs calcaires en deux grandes catégories : les tufs autochtones (formés *in situ*, majoritairement à proximité de la source) et les tufs allochtones.



Figure A.11. Répartition des tufs calcaires en Europe et Asie Mineure (Pentecost, 1995).

Nous pouvons retenir cinq modèles principaux de dépôts pour les tufs calcaires, basés sur la géométrie de ces dépôts et leur profil, ainsi que par leur association de faciès. En effet, pour chaque modèle géométrique, un faciès prépondérant y est associé.

- **Le modèle de résurgence, ou modèle de source perchée (*perched springline model*) :**

Ce modèle de dépôt, directement lié à une résurgence, se développe majoritairement dans des régions vallonnées et comprend deux catégories en fonction de la distance à la source, les dépôts proximaux* (en amont, dépôts les plus proches de la source), et les dépôts distaux* (en aval).

Les dépôts proximaux se trouvent au niveau même de la résurgence ou de ses proches environs. Ils forment majoritairement des monticules lobés ou en forme d'éventail et peuvent atteindre des centaines d'hectares en superficie (Fig. A.12). La surface supérieure des monticules formés est très souvent légèrement convexe, ou parfois extrêmement plane, tandis que les aires périphériques offrent un pendage beaucoup plus prononcé, offrant ainsi des pentes raides, voire quasi-verticales, pouvant générer des cascades. Les mousses (bryophytes) jouent un rôle extrêmement important dans l'édification des tufs calcaires à modèle de source et peuvent s'accrocher aux cascades d'eau au niveau des pentes les plus raides. Ces bryophytes devenant rapidement encroûtés, leur morphologie verticale est préservée et devient caractéristique de la structure de ces « cascades pétrifiantes ». D'un point de vue composition faunique, ces milieux sont colonisés par des organismes invertébrés tels que des gastéropodes pulmonés ainsi que quelques espèces de marais.

Les dépôts distaux sont situés en aval des dépôts proximaux précédents, au niveau des pentes des basses vallées. Ils peuvent être incisés par des chenaux, contenir des paléosols, et sont susceptibles d'être remaniés lors d'une incision fluviale. La majorité de ces dépôts distaux sont caractérisés par un faciès à intraclastes.



Figure A.12. Modèle de source perchée (*perched springline model*) de tufs calcaires, dépôt de la vallée de Tajuna, Espagne (Pedley, 2009).

• **Le modèle fluvial (*fluvial model*) :**

Deux modèles de dépôt de tufs calcaires en milieu fluvial existent dans la littérature, un modèle fluvial en tresses et un modèle de barrage.

Le modèle fluvial en tresses prédomine dans les aires connaissant un flux d'eau relativement libre ; les dépôts carbonatés sont alors associés à des chenaux actifs en tresses, avec une présence majoritaire de tufs calcaires à intraclastes et oncoïdes. La taille de ces oncoïdes s'accroît en fonction de la direction du courant, mais ne dépasse rarement les soixante centimètres de diamètre (taille caractéristique : 10 à 40 cm). Localement et occasionnellement, des petites irrégularités et des obstructions générées par la présence de végétation (phytohermes) engendrent la formation de « stromatolithes fluviaux » (Fig. A.13), qui ressemblent à des petits dômes (microhermes) présentant une lamination bien particulière.

Le modèle de tufs calcaires de barrage (Fig. A.14) s'établit généralement dans des environnements de faible débit d'eau et/ou dans des gorges. Une retenue d'eau va être créée par l'édification d'un barrage en travers du flux d'eau, le plus souvent par l'action de végétaux (phytohermes), générant une cascade immédiatement en aval. Ces barrages, pouvant atteindre plusieurs mètres de hauteur, apparaissent souvent en groupe de barrages successifs le long de la rivière. Le flux d'eau circule alors à travers ces barrages par l'intermédiaire d'un lac, dont l'étendue géographique peut varier de quelques mètres jusqu'à plusieurs kilomètres, présent entre chacun de ces barrages.



Figure A.13. Tuf calcaire fluvial avec formations stromatolithiques (*microherms*), dépôt du Parc Naturel de Ruidera, Espagne (Pedley, 2009).



Figure A.14. Tuf calcaire de barrage, entre deux lagunes, dépôt du Parc Naturel de Ruidera, Espagne (Pedley, 2009).
Echelle : hauteur du barrage = 8 m.

- **Le modèle lacustre (*lacustrine model*) :**

La colonisation par des bactéries, des algues et des végétaux supérieurs de larges étendues d'eau, plus ou moins stagnante, ajoutée à l'augmentation du taux de saturation en carbonate de calcium de l'eau lors des saisons chaudes, va entraîner la précipitation de tufs calcaires autour de ces populations biologiques. Des dômes stromatolithiques vont pouvoir se former, ainsi que de grands récifs de phytohermes. Une caractéristique particulière de ces eaux de lac est leur couleur turquoise (Fig. A.15) expliquée par la présence constante d'activité microbienne.



Figure A.15. Tuf calcaire lacustre, dépôt du Parc Naturel de Ruidera, Espagne (Pedley, 2009).

- **Le modèle palustre (*paludal model*) :**

Le modèle palustre se développe typiquement dans des fonds de vallée, au niveau de zones de faible énergie hydraulique, dans des zones d'eau très stagnante. Les dépôts calcaires peuvent occuper la largeur entière de la vallée et s'étendre sur plusieurs kilomètres de long.

- **Les tufs de cascade (*cascade tufas*) :**

Le modèle de tufs en cascade, que l'on peut retrouver dans les dépôts de résurgence (cf. *supra*), est maintenant considéré comme un modèle à part entière par les spécialistes, trouvant ainsi sa place dans cette classification. Ce modèle se développe au niveau de surfaces quasi-verticales, lorsque la topographie du terrain devient extrêmement abrupte (p. ex. à Pont-en Royans : Fig. A.16, et à La Sône : Fig. A.17, en Isère). Les structures caractéristiques du modèle en cascade sont les « cascades pétrifiantes » que l'on peut observer dans toutes les régions du monde.



Figure A.16. Cascade de tuf à Pont-en-Royans (Isère).



Figure A.17. Cascade de tuf à La Sône (Isère).

A.I.2.1.2. Caractérisation pétrographique des travertins *s.l.*

« Microfacies analysis has the advantages over traditional sedimentological approaches of being interdisciplinary, and integrating sedimentological, paleontological and geochemical aspects. »

(E. Flügel, 2004)

A.I.2.1.2.1. La fabrique* (*fabric*).

Les caractéristiques texturales et structurales d'un sédiment carbonaté (*fabric*) sont identifiables directement par une observation à l'œil nu (*mesofabric*) d'une surface polie du sédiment, ainsi que par des observations en lame mince et au microscope électronique à balayage pour les caractères microscopiques (*microfabric*). Dans le cas des travertins *s.l.*, la *mesofabric* réfèrera à la porosité visible du sédiment ainsi qu'aux litages susceptibles d'affecter la roche et son aspect éventuellement laminé, et à la reconnaissance de formes sédimentaires connues (p. ex. ooïdes et oncoïdes) ; la *microfabric* fournira des informations sur les paramètres (physico-chimiques et/ou biologiques) ayant influencé la formation du travertin *s.l.* et sur l'évolution diagénétique de ce dernier, et permettra d'expliquer les caractéristiques physiques du sédiment (Pentecost, 2005, p. 19).

• La mésofabrique (*mesofabric*) :

Elle est particulièrement définie par la porosité visible du sédiment, la présence de pores caractérisant la plupart des travertins. Cette porosité peut être divisée en plusieurs types (Fig. A.18, Pentecost, 2005, p. 30) :

intercrystalline, intergranular, mouldic, fenestral, shelter, framework, burrowing porosity. Elle est engendrée par plusieurs facteurs qui peuvent être l'action d'organismes invertébrés fouisseurs creusant leur galerie dans la roche, la présence de fragments de plantes (feuilles, branches, racines) ou de mousses lors de la précipitation du carbonate, et, en particulier dans le cas des travertins s.s., la présence d'inclusions gazeuses (*gas bubbles*) dans le sédiment (souvent associées à la précipitation de voiles algaies). En parallèle des ces facteurs, une certaine fracturation de la roche, accompagnée par un phénomène de dissolution, est susceptible de donner un aspect caverneux au travertin.

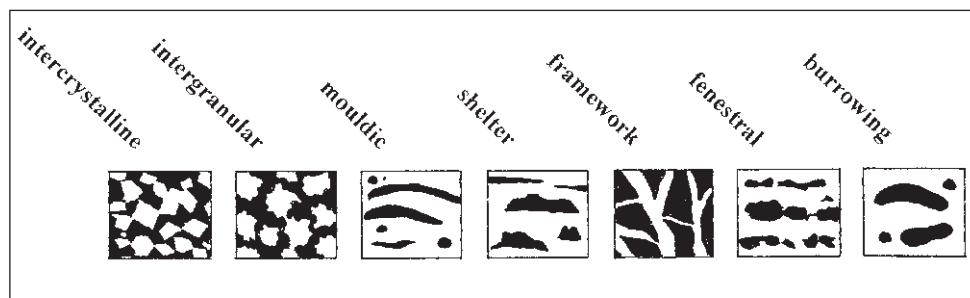


Figure A.18. Les principaux types de porosité des faciès de travertins (Pentecost, 2005) ; de gauche à droite : *intercrystalline, intergranular, mouldic, shelter, framework, fenestral, burrowing porosity*.

Un second caractère définissant la *mesofabric* d'un travertin est la présence éventuelle de litage au sein de la roche. Ces litages souvent plans, comme nous pouvons l'observer au sein du tuf calcaire de Rolampont (Haute-Marne, France) (Fig. A.19), sont la conséquence de variations irrégulières dans la vitesse de dépôt du travertin, comme cela a pu être décrit pour des travertins d'Italie centrale (Chafetz et Folk, 1984, p. 298). Des surfaces d'érosion sont également susceptibles d'exister au sein de ce litage.



Figure A.19. Litages dans le tuf calcaire de Rolampont (Haute-Marne).

• **La microfabrique (*microfabric*) :**

Elle est caractérisée par la taille des grains minéraux qui constituent le sédiment, par la forme de ces grains, et par les connexions qui les joignent entre eux. L'analyse des constituants d'un sédiment à l'échelle microscopique obéit à une nomenclature comprenant un certain nombre de termes utilisés pour la description des formes sédimentaires ; l'ensemble de ces termes sur lesquels nous nous appuierons ont été revus et regroupés par des auteurs spécialistes de la question (Verrecchia et Freytet, 1989) et sont maintenant utilisés dans la majorité des études de sédiments carbonatés, comme le montre une synthèse de l'analyse des éléments microscopiques des travertins (Pentecost, 2005, p. 19-29).

En tant que formations calcaires, la grande majorité des travertins sont constitués de carbonate de calcium, sous la forme de grains de calcite et/ou de grains d'aragonite. La calcite apparaît majoritairement sous la forme de cristaux individualisés dont la taille peut être submicroscopique ($<0,2$ mm) à macroscopique (>10 mm), tandis que l'aragonite apparaît souvent sous la forme de cristaux microscopiques aciculaires. La taille des cristaux microscopiques de calcite varie entre des textures micritiques (<5 μm), microsparitiques (5-15 μm) et sparitiques (>15 μm).

S'agissant de la forme des minéraux constituant le sédiment, la cristallisation est dite anhédrade (ou xénomorphe), lorsque les grains ne présentent pas de face cristalline décelable, subhédrade (ou subautomorphe) lorsque les faces cristallines sont imparfaitement exprimées mais sont susceptibles d'être reconstituées, ou euhédrade (ou automorphe) si les cristaux sont correctement développés et les faces cristallines parfaitement exprimées.

La *microfabric* est fonction de l'environnement de dépôt du travertin et est influencée par les conditions physico-chimiques et biologiques qui prévalent lors de la formation du carbonate de calcium et de la croissance cristalline. Elle est également susceptible d'être modifiée par les phénomènes diagénétiques postérieurs à la formation du dépôt.

La texture la plus fréquemment observée dans les travertins est la micrite, qui apparaît sombre et presque opaque en lame mince et dont les frontières cristallines sont souvent floues ou difficilement définissables en lame mince. La micrite est souvent observée en association avec des cristaux microsparitiques et sparitiques caractérisés en lame mince par une certaine transparence et qui peuvent se présenter parfois sous des formes cristallines particulières : cristaux à croissance fibreuse, cristaux à croissance colonnaire, cristaux aciculaires.

La présence de communautés biologiques (bactérie, algues, bryophytes) peut avoir une influence directe sur la texture sédimentaire (*biofabric*). Des communautés bactériennes sont connues pour engendrer des structures particulières que sont les cristaux en forme d'arbustes (*shrub crystals*) ou de buissons (*bush crystals*) (Kitano, 1963 ; Chafetz et Folk, 1984), mais ce sujet fut rediscuté quant à une action simultanée de processus abiotiques combinés à ces processus bactériens (Chafetz et Guidry, 1999). Les travertins colonisés par les cyanobactéries *Phormidium incrustatum* et *Schizothrix* possèdent une texture essentiellement micritique, tandis que la cya-

nobactérie *Rivularia haematites* engendre un travertin microsparitique à sparitique. Les travertins associés à certaines algues eucaryotes (*Gongrosira*, *Oocardium* et *Vaucheria*) montrent une texture mixte, micritique et sparitique, comme les travertins colonisés par des mousses (bryophytes). Des cas particuliers de cristallisations dendritiques de calcite apparaissent dans des travertins caractérisés par des grandes vitesses de dépôt et des hautes températures. La calcite forme alors des cristaux rayonnants (*ray crystals*) ou des cristaux en forme de plume (*feather crystals*) de 1 à 10 cm, comme cela a été observé dans les travertins d'Italie centrale (Guo et Riding, 1992), qui présentent des lamines bien dessinées, séparées par des lamines d'aragonite.

Contrairement à la calcite, l'aragonite ne croît que très rarement en grands cristaux dans les travertins (Pentecost, 2005, p. 29), et apparaît sous la forme de cristaux fins et aciculaires de quelques dizaines de microns, au sein d'agrégats cristallins massifs ou formant des sphérules ou des botryoïdes* dans le sédiment. Elle est souvent repérée au sein de la cristallisation en arbuste (*shrub crystals*) en association avec une activité microbienne, et est connue pour précipiter à des hautes températures, généralement supérieures en moyenne à 40 °C (Folk, 1994). Par le biais de processus diagénétiques, et souvent relativement rapidement, l'aragonite est susceptible d'être remplacée par de la calcite, comme l'ont pu démontrer par exemple Guo et Riding (1992) dans les travertins pléistocènes de *Rapolano Terme* (Toscane, Italie).

A.I.2.1.2.2. La sédimentologie de faciès.

Les signatures sédimentologiques offertes par les dépôts de travertins *s.l.* ont été largement étudiées et des classifications des différents faciès sédimentaires ont pu être proposées. Nous proposons ici une brève synthèse des faciès susceptibles d'être rencontrés au sein de ces dépôts en insistant sur les caractéristiques et l'origine des éléments pétrographiques observés, leur association éventuelle et sur leur lien avec l'environnement de dépôt correspondant.

• Les faciès sédimentaires de travertins :

La précipitation des travertins se fait majoritairement de manière rapide et complexe, offrant des variations latérales et verticales de faciès souvent marquées au sein d'un même site. Ces variations de faciès sont la conséquence des fluctuations que subit le flux des eaux au sein du système de travertins : variations du débit, de la température, du cheminement directionnel, de la composition chimique, mélange avec des eaux de nature différente (eau douce, eau de pluie), effets climatiques, influences pédogénétiques. La topographie du site va jouer un rôle majeur dans le contrôle de la séquence sédimentaire et des faciès associés, depuis la source jusqu'aux parties les plus distales.

L'architecture sédimentaire complexe qui résulte d'un tel système de dépôt rend compte d'une lithologie type à un dépôt de travertin. Celui-ci est caractérisé par des calcaires souvent très bien lités et très finement laminés, composés dans la partie proximale* de croûtes macrocristallines (*crystalline crust travertine*) et dans la partie distale par une boue carbonatée microcristalline bactérienne et cyanobactérienne (Guo et Riding, 1998, 1999).

; Özkul *et al.*, 2002). Les travaux réalisés sur les travertins de *Rapoleno Terme* (Guo et Riding, 1998, 1999) ont pu mettre en lumière les différents faciès qui constituent la séquence sédimentaire en association avec les différents milieux de dépôt. Plusieurs lithotypes de faciès ont ainsi été définis :

- *Crystalline crust* (Fig. A.20) :

Les croûtes cristallines (*crystalline crust*) forment typiquement d'épais dépôts très étendus latéralement au niveau de pentes et de falaises et reflètent une précipitation rapide issue d'écoulements extrêmement turbulents. Elle sont généralement d'un aspect dense, d'un blanc brillant et grossièrement fibreux avec des cristaux de calcite rayonnants (*ray crystals*) ou en plume (*feather crystals*) perpendiculaires à la surface de dépôt.

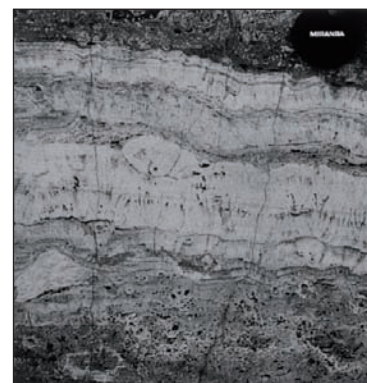


Figure A.20. Croûte cristalline dense, blanche, laminée et fibreuse, typique d'une précipitation rapide (Guo et Riding, 1998).

- *Shrub travertine* (Fig. A.21) :

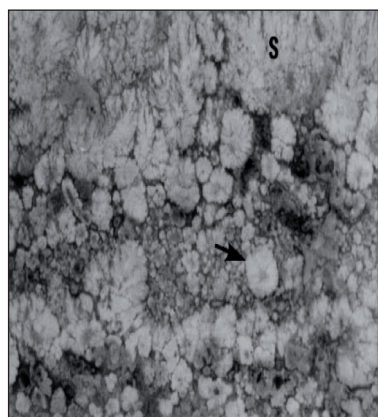


Figure A.21. Faciès « *Shrub travertine* » (indiqué par le S) (Guo et Riding, 1998).

C'est un faciès poreux dominé essentiellement par des structures en forme de petits buissons (*shrub-like growths*), qui se développe sur une surface sub-horizontale, dans les bassins des terrasses (*terrace pools*) et dans des dépressions (*depressions*). Les buissons micritiques à sparitiques (*micrite/spar-rhomb shrubs*), de quelques millimètres à quelques centimètres et orientés verticalement, sont de couleurs gris pâle à brun pâle et constituent une morphologie dendritique irrégulière. Ils sont agencés en multiples couches horizontales (de 1 à 3 cm d'épaisseur) séparées par des fines lamines micritiques. Leur genèse

est principalement due à une activité microbienne mais une part de processus abiotiques influe également sur la précipitation.

- *Pisoid travertine* :

Les pisoides (Fig. A.22), communs dans les travertins, se développent aussi bien dans les petits bassins de terrasse (*small terrace pools*) ou sur des surfaces à faible pente, que dans de grands bassins créés par certaines dépressions, en association avec des structures buissonnantes (*shrubs*) et de la boue micritique. De couleur généralement blanche pouvant tirer sur le jaune pâle, ils offrent une diversité de forme, de sphérique ou

sub-arrondie jusqu'à des formes complètement irrégulières. Leur développement est dépendant de l'énergie du milieu (processus inorganiques) et de l'influence microbienne.

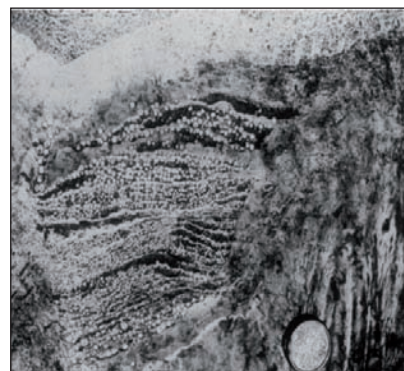


Figure A.22.
Faciès «Pisoid travertine»
(Guo et Riding, 1998).

- *Paper-thin raft travertine* :

Egalement nommé « glace d'eau chaude » (*hot water ice*) ou « glace de calcite » (*calcite ice*) (Fig. A.23), ces « radeaux fins comme du papier » (*paper-thin rafts*), fins et délicats, se développent et forment une croûte cristalline à la surface de l'eau, jusqu'à leur chute au fond, sous le poids croissant de la formation de calcite et de la croissance cyanobactérienne. Ainsi se développe un faciès particulier (Fig. 24), marqué par un empilement de fines plaquettes successives sur le fond de petits bassins stagnants ou de chenaux d'eaux calmes, voir dormantes.



Figure A.23.
« Radeaux » de calcite à la surface de l'eau
(« hot water ice »).



Figure A.24.
Faciès «Paper-thin raft» associé à des racines
(Guo et Riding, 1998).

- *Coated bubble travertine* (Fig. A.25) :

Ce faciès se développe lorsque des bulles de gaz se retrouvent encroûtées lors d'une précipitation très rapide du carbonate de calcium, se retrouvant piégées près de la surface sous les *paper-thin rafts*, ou au sein de cristaux développées en présence de végétation. De diamètre compris entre 1 et 4 mm, les fantômes de bulles

présentent une couche interne de micrite et un encroûtement externe (côté de l'eau) de cristaux euhédraux, souvent aragonitiques.

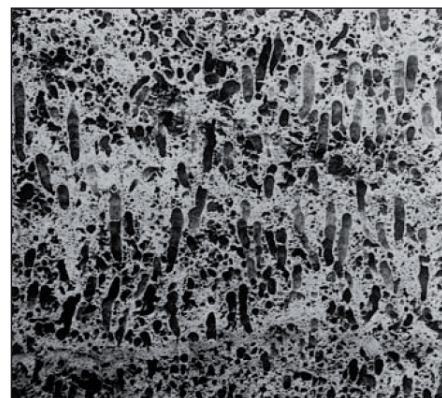


Figure A.25.
« Coated bubble travertine »,
issu de l'encroûtement de bulles de gaz
(Guo et Riding, 1998).

- *Reed travertine* (Fig. A.26) :

Lorsque les eaux refroidissent, des racines de végétaux (*reeds*) ou des herbes sont susceptibles de se développer et vont être encroûtées par une précipitation du carbonate, majoritairement micritique. Le moule généré par ces organismes restera vide, donnant sa grande porosité à ce type de faciès, ou sera partiellement rempli de grains sparitiques. Souvent associé au *paper-thin raft*, ce faciès est principalement observé dans des travertins d'eaux peu profondes et calmes.



Figure A.26.
Faciès « Reed travertine »
(Guo et Riding, 1998).

- *Lithoclast travertine* (Fig. A.27) :



Figure A.27.
«Lithoclast travertine »
(Guo et Riding, 1998).

L'intégration de matériaux issus de l'érosion des versants travertineux au sein d'un travertin en cours de formation, particulièrement au niveau des pentes distales et dans les dépressions, génère la formation d'un travertin lithoclastique (*lithoclast travertine*). De couleur généralement grise sombre à brune, ils sont dominés par un sédiment silto-sableux provenant majoritairement de dépôts proximaux et peuvent contenir une grande proportion de fragments détritiques de plantes, de racines, ainsi que des gastéropodes et des ostracodes.

- **Les faciès des tufs calcaires :**

Les faciès de tufs calcaires ont été étudiés aussi bien à l'échelle d'un site particulier, citons notamment les études sur les tufs d'*Urrea de Jalón*, en Espagne (Arenas *et al.*, 2000) et du bassin du Diborrato, en Italie centrale (Gandin et Capezzuoli, 2008 ; Capezzuoli *et al.*, 2008), que par des approches comparatives (Pedley *et al.*, 1996), et ont fait l'objet de classification (Pedley, 1990 ; Pentecost, 2005) ainsi que d'une brève synthèse récente (Pedley, 2009).

L'élément principal qui influence fortement les faciès sédimentaires des tufs calcaires, en parallèle des caractéristiques physico-chimiques des eaux et de la topographie du système, est la présence d'une végétation souvent importante, voir luxuriante, dans le milieu de précipitation. Elle se marque par le développement de plantes, terrestres et aquatiques, de racines, de mousses et d'algues, en particulier dans les milieux de haute énergie, auxquelles est également susceptible de s'ajouter la prolifération de colonies bactériennes.

Les tufs calcaires présentent typiquement une structure sédimentaire très poreuse, très peu ou grossièrement litée, caractérisée par des fragments de macro-végétaux (*phytoherm facies*), par la présence éventuelle de sédiments détritiques silto-sableux (*intraclast tufa*) et/ou par des constructions exclusivement stromatolithiques (*stromatolitic tufa*) souvent caractérisés par la présence d'oncoïdes issues d'une précipitation cyanobactérienne (*cyanolith oncoïdal tufa*). La question de la part d'influence des processus physico-chimiques et celle des processus biologiques sur la précipitation du carbonate est encore débattue (Pedley, 2009, p. 235). Le dégazage de CO₂ et la chute de température de l'eau lors de son émergence, ou plus en aval au sein de milieux turbulents, entraîne une précipitation relativement rapide du carbonate sous la forme de cristaux sparitiques formant une croûte microcristalline et encroûtant les organismes biologiques, associés parfois à un ciment micritique. En parallèle, le carbonate de calcium précipite également au voisinage immédiat d'organismes photosynthétiques (macrophytes, microphytes et bactéries). La chute de la teneur en CO₂ de l'eau provoquée par leur activité de photosynthèse entraîne une saturation croissante en carbonate de calcium qui précipite alors en ciment micritique. Pour leur part, les communautés bactériennes s'associent et s'organisent au sein d'un biofilm qui se développe à la surface de l'eau (*EPS = Extracellular Polymeric Substances*), extrêmement fin et fragile mais qui est source de la précipitation d'un ciment micritique, de cristaux sparitiques ou de péloïdes.

A.I.2.2. Caractérisation géochimique des travertins *s.l.* et des eaux associées.

« Geochemical sediments of various types are an often overlooked but extremely important component of global terrestrial environments. »

D. J. Nash and S. J. McLaren (2007)

A.I.2.2.1. Les isotopes stables.

En parallèle des progrès techniques réalisés dans la conception et le développement technologique des spectromètres de masse, appareils qui permettent maintenant des mesures très rapides et précises de la composition isotopique des carbonates et des eaux associées, l'apport de l'étude des isotopes stables, en particulier de l'oxygène et du carbone, est devenu indispensable et conséquent en sédimentologie des carbonates. Les isotopes sont des éléments chimiques de même numéro atomique Z (c.-à-d. de même nom et de même position dans la classification de Mendeleïev) mais qui diffèrent par leur masse atomique A . Ils possèdent ainsi le même nombre de protons (Z) mais des nombres différents de neutrons (N), et donc une masse atomique différente (car $A = N + Z$).

Ainsi, l'élément oxygène possède trois isotopes stables naturels, en proportions très différentes : ^{16}O (99,73 %), ^{17}O (0,0375 %) et ^{18}O (0,1995 %), dont les masses atomiques respectives sont 16, 17 et 18. Le carbone possède deux isotopes stables, ^{12}C (98,89 %) et ^{13}C (1,11 %), et un isotope radioactif, le ^{14}C , dont la demi-vie de 5730 ± 40 ans en fait un excellent outil de datation jusqu'à environ 50 ka B.P.

Les rapports des deux couples d'isotopes, ^{12}C et ^{13}C pour le carbone, et ^{16}O et ^{18}O pour l'oxygène, subissent des modifications, discrètes mais significatives, durant les processus physiques, chimiques, ou biologiques du fait des différences de comportement de chacun des isotopes (différences induites par les différences de masse entre les isotopes). Ce phénomène engendre une répartition différente des isotopes lourds et légers entre deux composés ou entre deux phases lors de ces processus, on parle alors de **fractionnement isotopique**. Afin de quantifier ce fractionnement isotopique, il est défini un **coefficient de fractionnement isotopique**, noté α , qui est le rapport des rapports isotopiques de deux composés, ou de deux phases :

$$\alpha_{AB} = R_A / R_B$$

Où R_A et R_B représentent les rapports de l'isotope lourd par rapport à l'isotope léger pour le composé (ou la phase) A et le composé (ou la phase) B, respectivement.

Les différences de comportement de deux isotopes lors d'une réaction étant très faibles, les différences de composition isotopique entre deux composés (ou deux phases) seront très faibles, et le coefficient de fractionnement isotopique (α) est ainsi toujours proche de 1. Ce coefficient de fractionnement isotopique est dépendant de la température suivant la formule :

$$\ln \alpha = PT^2 + QT^1 + R$$

Où P, Q et R sont des constantes empiriques, et T est la température.

Par exemple, dans le cas du fractionnement isotopique entre la calcite et l'eau, qui est le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de la calcite divisé par le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de l'eau ($\alpha_{\text{calcite-eau}} = [^{18}\text{O}/^{16}\text{O}]_{\text{calcite}} / [^{18}\text{O}/^{16}\text{O}]_{\text{eau}}$), le coefficient de fractionnement $\alpha_{\text{calcite-eau}}$ est de 1,0286. Celui-ci, proche de 1 mais supérieur à 1, indique que la calcite est enrichie en ^{18}O par rapport à l'eau lorsque l'équilibre isotopique est atteint. Et, plus le coefficient de fractionnement α se rapproche de 1, plus le fractionnement isotopique est faible, et moins la différence de composition isotopique entre les deux composés (ou les deux phases) sera importante.

Cependant, le coefficient de fractionnement α est défini pour une réaction qui se produit à l'équilibre isotopique. Or, cet équilibre isotopique n'est pas toujours atteint au cours de la réaction entre deux composés. C'est le cas lorsque la réaction est unidirectionnelle ou incomplète, au cours de laquelle des effets cinétiques peuvent alors se produire. Dans ce cas, les produits de réaction seront plus enrichis en isotopes légers qu'ils ne le seraient pour une réaction à l'équilibre isotopique. En effet, les liaisons formées avec des isotopes légers nécessitent moins d'énergie pour être brisées que les liaisons formées avec des isotopes lourds, ce qui va entraîner des plus grandes vitesses de réaction pour les molécules contenant des isotopes légers que pour les molécules contenant l'isotope lourd. En conséquence, les molécules contenant des isotopes légers échangeront ainsi plus facilement leurs atomes.

Dans le cas de la réaction de précipitation de la calcite, si celle-ci se réalise trop rapidement pour que l'équilibre isotopique puisse être atteint, la calcite formée par la réaction de précipitation sera enrichie en isotopes légers (^{16}O et ^{12}C), ou appauvrie en isotopes lourds (^{18}O et ^{13}C), plus qu'elle ne le serait si l'équilibre isotopique avait eu le temps d'être atteint lors de la réaction.

Les différences de rapport isotopique sont exprimées suivant **la notation δ** , qui exprime, non pas le rapport isotopique direct de l'échantillon, mais **la déviation du rapport d'un isotope lourd sur un isotope léger suivant un rapport isotopique standard**. Etant donné que ces différences sont très faibles dans la nature, elles sont exprimées en ‰.

Ainsi, pour les isotopes du carbone (le couple $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$), le rapport isotopique s'exprime :

$$\delta^{13}\text{C} = [(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{échantillon}} / (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{standard}}] - 1 \times (1000)$$

Et pour les isotopes de l'oxygène (le couple $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$), le rapport isotopique s'exprime :

$$\delta^{18}\text{O} = [(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{échantillon}} / (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{standard}}] - 1 \times (1000)$$

Le standard utilisé pour les mesures varie suivant l'élément pris en considération. Pour le carbone, les mesures sont effectuées par rapport au standard **VPDB**, pour *Vienna Pee Dee Belemnite*, qui correspond à des rostrés de bélemnites issus de la formation crétacée de la *Pee Dee*, en Caroline du Sud (Craig, 1957). Ce standard présente un rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ de **88,99** et un $\delta^{13}\text{C}=0$. Des valeurs positives du $\delta^{13}\text{C}$ indiquent alors un enrichissement relatif en ^{13}C de l'échantillon, alors que des valeurs négatives indiquent un appauvrissement. Pour l'oxygène, le standard utilisé préférentiellement pour les échantillons de carbonates est également le VPDB, mais un autre standard peut aussi être utilisé : le **SMOW** (*Standard Mean Ocean Water*), qui est un échantillon d'eau de référence ayant un rapport isotopique similaire à celui d'un échantillon moyen théorique d'eau de mer actuelle (Craig, 1961a). L'IAEA (*International Atomic Energy Agency*) fournit un équivalent calibré grâce à ce standard, appelé **VSMOW** (*Vienna SMOW*). C'est ce standard qui sera utilisé préférentiellement pour mesurer le $\delta^{18}\text{O}$ des eaux.

Pour l'étude de travertins et de tufs calcaires, les fractionnements des isotopes du carbone et de l'oxygène présentent un véritable intérêt puisqu'ils sont susceptibles de fournir de riches informations sur l'origine du dioxyde de carbone, sur les conditions physico-chimiques du processus de précipitation (évaporation, température) et sur l'influence d'éventuels processus métaboliques.

A.I.2.2.1.1. L'oxygène.

Le rapport des isotopes stables de l'oxygène présente un grand intérêt dans l'étude des roches carbonatées. L'eau présente dans la lithosphère échange des atomes d'oxygène avec le dioxyde de carbone (CO_2) dissous dans l'eau et, lorsque l'équilibre isotopique est établi, la différence entre le rapport isotopique des sédiments carbonatés et le rapport de l'eau permet d'estimer la (les) température(s) de l'eau dans laquelle les carbonates ont précipité. Des informations peuvent être également obtenues concernant les taux d'évaporation de l'eau dans laquelle a précipité le travertin.

• Le cycle hydrologique :

Avant de s'intéresser à la composition isotopique des carbonates, il est nécessaire de s'étendre sur les caractéristiques et les changements du rapport isotopique de l'oxygène dans l'hydrosphère actuelle (Pentecost, 2005, p. 130). La formation de la vapeur d'eau au-dessus des océans (phénomène d'évaporation) entraîne un fractionnement substantiel des isotopes de l'oxygène au cours du changement de phase de l'eau liquide en vapeur d'eau, car H_2^{16}O a une pression de vapeur supérieure à celle de H_2^{18}O . La vapeur d'eau ainsi créée est enrichie en isotopes légers (^{16}O et ^1H) par rapport à l'eau de mer. À l'inverse, lors du processus de condensation à partir de cette vapeur d'eau (c.-à-d. formation de nuage), la phase liquide (pluie ou neige) est enrichie en isotopes lourds (^{18}O et D) par rapport au nuage d'origine, tandis que la vapeur d'eau résiduelle (nuage) est enrichie en isotopes légers (^{16}O et ^1H) par rapport à la vapeur d'eau de départ. Puisque, par définition, l'océan actuel a une valeur de $\delta^{18}\text{O} = 0 \text{ ‰ SMOW}$, la vapeur d'eau et la pluie associée posséderont des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ négatives. La condensation de l'eau en équilibre avec la vapeur d'eau et son départ immédiat du nuage peut être décrite par l'équation de distillation de Rayleigh (Dansgaard, 1964) :

$$\delta^{18}\text{O}_v = [(\delta^{18}\text{O})_o + 1000] f^{(\alpha-1)} - 1000$$

Où $\delta^{18}\text{O}_v$ est le rapport isotopique de la vapeur restante, $(\delta^{18}\text{O})_o$ est le rapport isotopique original (avant que la condensation ne commence), f est la fraction de vapeur restante dans le nuage au temps t , et α est le coefficient de fractionnement.

Ce modèle montre que le $\delta^{18}\text{O}$ de la vapeur restante diminue (c.-à-d. est enrichi en ^{16}O) au fur et à mesure des condensations successives et, en parallèle, le $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations diminue également. Le fractionnement isotopique qui a lieu lors de l'évaporation de l'eau des océans et lors de la condensation de cette vapeur se traduit donc par un appauvrissement des eaux douces en ^{18}O et en ^2H par rapport à l'eau d'origine, l'eau de mer. La composition isotopique des précipitations est liée à un ensemble de paramètres environnementaux qui caractérisent la région d'origine de la vapeur d'eau et son trajet jusqu'à l'endroit où les précipitations ont lieu. Différents facteurs agissent ainsi sur la composition isotopique des précipitations :

- L'effet de latitude est associé au trajet vers les hautes-latitudes (vers les pôles) de nuages de plus en plus appauvris en isotopes lourds (^{18}O et D) au fur et à mesure des précipitations. Dans l'hémisphère nord, il est estimé à environ -0,18 ‰ par degré de latitude (Rozanski *et al.*, 1993, *in* Couchoud, 2008).
- L'effet d'altitude est lié au déplacement des nuages vers des régions aux altitudes plus élevées. La température de l'air diminue avec l'altitude, donc le $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations diminue aussi. Cet effet varie généralement entre -0,15 et -0,50 ‰ par 100 m (Clark and Fritz, 1997).
- L'effet de continentalité traduit l'appauvrissement des nuages en ^{18}O lors de leur progression vers l'intérieur des terres. Il est voisin de -2,5 ‰ par 100 km dans les régions de basse altitude (Rozanski *et al.*, 1993, *in* Couchoud, 2008) mais peut-être beaucoup plus élevé dans les régions à fort relief pour atteindre -5 ‰ pour 200 km (Yong *et al.*, 1989, *in* Couchoud, 2008).
- L'effet de masse est associé à la quantité de précipitations, avec des valeurs plus basses durant la saison ou la période pluvieuse (Dansgaard, 1964 ; Bar-Mathews *et al.*, 1999, *in* Couchoud, 2008).
- L'influence de la température de surface sur les variations saisonnières du $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations, notamment dans les régions de hautes à moyennes latitudes. La température, liée à l'humidité de l'air, contrôle la pluviosité lors du déplacement des masses d'air vers les pôles (Couchoud, 2008).
- L'effet de température océanique correspond au fractionnement entre la phase liquide et gazeuse à l'origine de l'humidité atmosphérique (Dorale *et al.*, 2002, *in* Couchoud, 2008).
- Les changements saisonniers de région source et de trajectoire des masses d'air, tels que l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO) en Europe, contrôlent les variations saisonnières de $\delta^{18}\text{O}$ (Couchoud, 2008).

Les changements climatiques à plus long terme ont une influence sur la composition isotopique des précipitations par le biais de différents paramètres. Dansgaard (1964) a pu établir une relation linéaire entre le $\delta^{18}\text{O}$ mesurées dans les précipitations et la température annuelle de l'air.

L'hydrogène est affecté d'une façon identique que l'oxygène, par l'effet de quantité de précipitations et par l'effet de température sur le fractionnement isotopique. Ainsi, sur la base d'un nombre considérable d'analyses de la composition isotopique d'eaux météoriques collectées à différentes altitudes, Craig (1961b) a pu montrer l'existence d'une relation linéaire entre le $\delta^{18}\text{O}$ et le δD des eaux météoriques. L'auteur a ainsi pu établir la **droite des eaux météoriques mondiales** (*Global Meteoric Water Line* = **GMWL**). Les seules eaux météoriques significativement décalées par rapport à cette droite sont des eaux de lacs africains, avec des conditions d'évaporation particulières. Il est ainsi possible d'identifier des eaux qui ont subi des échanges isotopiques avec des roches à la suite de leur percolation dans la croûte terrestre, car la composition isotopique des ces eaux s'écarte de la droite des eaux météoriques. C'est le cas des eaux métamorphiques qui voient leur composition isotopique être modifiée au cours des interactions fluide-roche.

Les eaux engendrant un dépôt de travertin *s.l.* sont exclusivement, à de rares exceptions près, issues des eaux météoriques. Ainsi, leur $\delta^{18}\text{O}$ est similaire au $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations locales (Pentecost, 2005, p. 131). Les quelques analyses du $\delta^{18}\text{O}$ d'eaux responsables d'un dépôt de travertin ou de tuf calcaire font ressortir un groupe de valeurs en $\delta^{18}\text{O}$ avoisinant les -7 ‰ VSMOW, caractéristiques d'eaux météoriques de latitudes moyennes (Pentecost, 2005, p. 131-132). Seules les eaux de certains lacs responsables d'un dépôt carbonaté présentent des valeurs en $\delta^{18}\text{O}$ positives dues à l'influence principale du phénomène d'évaporation. Quelques eaux apparaissent très appauvries en ^{18}O , comme c'est le cas pour les eaux de la région de *Mammoth Hot Springs* (États-Unis), traduisant dans ce cas un échange d'oxygène entre l'eau et la roche locale lors de sa circulation souterraine. Les eaux des sources de travertins d'Italie centrale ont une composition isotopique similaire à celle des eaux météoriques locales. La précipitation du carbonate de calcium, à partir des ions hydrogénocarbonates en équilibre isotopique avec l'eau, s'accompagne d'un fractionnement isotopique qui se traduit par un enrichissement de la calcite formée en $\delta^{18}\text{O}$ au détriment de l'eau environnante. À l'équilibre, l'oxygène de la calcite est ainsi plus lourd que l'eau de précipitation. Typiquement, dans le cas d'une eau de $\delta^{18}\text{O} = 0$ ‰ et à une température de 25 °C, le $\delta^{18}\text{O}$ de la calcite formée est de 28,6 ‰ SMOW. Le facteur d'enrichissement en oxygène diminue depuis environ 32 ‰ SMOW à 10 °C jusqu'à environ 24 ‰ à 50 °C (Pentecost, 2005, p. 132). Cette dépendance du coefficient de fractionnement $\alpha_{\text{calcite-H}_2\text{O}}$, inversement proportionnel à la température, peut s'exprimer ainsi :

$$1000 \ln \alpha_{\text{calcite-H}_2\text{O}} = (2,78 \times 10^6/T^2) - 2,89$$

En parallèle, la température de dépôt à l'équilibre peut être estimée :

$$T \text{ (°C)} = 16,9 - 4,2(\delta^{18}\text{O}_c - \delta^{18}\text{O}_w) + 0,13(\delta^{18}\text{O}_c - \delta^{18}\text{O}_w)^2$$

Où $\delta^{18}\text{O}_c$ est le $\delta^{18}\text{O}$ (PDB) de la calcite (c.-à.-d. du CO_2 produit par la calcite après attaque par l'acide phosphorique) et $\delta^{18}\text{O}_w$ est le $\delta^{18}\text{O}$ (SMOW) de l'eau.

Cette équation de température a été abondamment utilisée pour des estimations de paléotempératures, en se basant sur la température de dépôt de la calcite dans des conditions d'équilibre isotopique entre l'eau et le

carbonate. Cette équation fut révisée à partir d'exemples de dépôts à des températures légèrement plus basses, pour des $\delta^{18}\text{O}_c$ et $\delta^{18}\text{O}_w$ donnés (Hays and Grossman, 1991) :

$$T (^{\circ}\text{C}) = 15,7 - 4,36(\delta^{18}\text{O}_c - \delta^{18}\text{O}_w) + 0,12(\delta^{18}\text{O}_c - \delta^{18}\text{O}_w)^2$$

Le facteur $\delta^{18}\text{O}_w$ est susceptible de posséder une grande incertitude pour les eaux du passé (eaux anciennes), incertitude liée aux différents facteurs qui interviennent et agissent sur sa valeur (cf. *supra*).

L'aragonite est 0,6 ‰ plus lourd que la calcite à une température de 25 °C (Tarutani *et al.*, 1969) et son fractionnement isotopique est également dépendant de la température. Sous les conditions d'équilibre isotopique, une baisse de 1 ‰ du $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates équivaut à une augmentation de 4,5 °C de la température de précipitation.

• Les isotopes de l'oxygène dans les travertins *s.l.*

Les premières mesures de $\delta^{18}\text{O}$ sur des travertins ont été effectuées par Craig (1953, *in* Pentecost, 2005) sur un petit échantillon d'un dépôt issu des sources thermales de *Yellowstone*. A la lecture de ces premiers résultats, les travertins n'apparaissent pas être précipités à l'équilibre isotopique, mais l'auteur ne disposait pas de données suffisamment significatives pour conclure véritablement sur ce phénomène. Une étude plus détaillée sur les travertins de sources thermales d'Italie a montré que l'équilibre isotopique entre le carbonate déposé et l'eau de précipitation n'était atteint qu'à partir d'une distance d'environ 100 mètres depuis la source (Fritz, 1965, *in* Pentecost, 2005). Ces résultats sur les travertins italiens ont mis en évidence la chute du $\delta^{18}\text{O}_c$ (c.-à-d. le $\delta^{18}\text{O}$ du carbonate) en parallèle de l'augmentation de la température de l'eau ; ce fait est cohérent avec le phénomène de dépendance vis-à-vis de la température du fractionnement isotopique de l'oxygène entre l'eau et les carbonates.

Cependant, quelques écarts existent entre les valeurs mesurées et les valeurs théoriques à l'équilibre isotopique. A 0 °C, le $\delta^{18}\text{O}$ de la calcite est presque plus lourd de 2 ‰ par rapport à la valeur à l'équilibre pour cette température. Gonfiantini *et al.* (1968) sont arrivés aux mêmes conclusions, mettant en évidence que l'équilibre n'était atteint seulement lorsque le taux de dégazage de CO_2 et le taux de précipitation étaient réduits. Dans cette même étude, portant sur les travertins d'Italie centrale, seul un petit nombre parmi leurs échantillons ont été déposés à l'équilibre. Les échantillons provenant des sources chaudes de *Bagnaccio* et de *Bagni San Filippo* ont montré l'enrichissement en ^{18}O du travertin avec l'aval, corrélé à un enrichissement en ^{13}C . Les enrichissements en ^{18}O et en ^{13}C sont expliqués par deux phénomènes différents, tous les deux dépendant du facteur temps, que sont le refroidissement des eaux de précipitation accompagné d'une certaine évaporation et le dégazage préférentiel de la forme légère $^{12}\text{CO}_2$. De tels effets seraient observables pour une précipitation à l'équilibre ; une précipitation en non-équilibre va décaler la relation entre les deux isotopes vers une nouvelle ligne.

Deux sites du complexe de *Mammoth Hot Springs*, *Main Springs* et *New Highland Terrace*, ont fait l'objet d'une étude approfondie par Friedman (1970). Les résultats concernant le $\delta^{18}\text{O}_c$ et la température depuis la source sont différents selon les deux sites pris en compte. Sur le site de *New Highland Terrace*, les valeurs isotopiques sont situées en dessous de la ligne d'équilibre et aboutissent à des calculs de températures de 18 °C ou plus, des valeurs supérieures aux températures mesurées. Pour le site de *Main Springs*, la quasi-totalité des valeurs isotopiques se trouvent proche de la ligne d'équilibre. Cette différence entre les deux sites peut s'expliquer par la vitesse de dépôt, très nettement supérieure sur le site de *New Highland Terrace*. C'est par ce phénomène à *New Highland Terrace* que Turi (1986) explique le déséquilibre isotopique, conséquence d'un retard dans la cristallisation du carbonate. Le complexe de *Mammoth Hot Springs* a également été abordé par Fouke *et al.* (2000), qui ont étudié le site d'*Angel Terrace*. Les auteurs ont analysé l'évolution de la composition isotopique des travertins depuis la source chaude jusqu'en aval, à des points privilégiés, et ont mis en évidence une augmentation du $\delta^{18}\text{O}_c$ de 4 à 8,6 ‰, qu'ils expliquent par un phénomène d'évaporation croissant vers l'aval.

A.I.2.2.1.2. Le carbone.

Les isotopes stables du carbone sont susceptibles de subir, au même titre que l'oxygène, un fractionnement au cours de réactions chimiques. Les rapports isotopiques du carbone sont mesurés par rapport au standard *Vienna PeeDee Belemnite* (VPDB, cf. *supra*), mesuré sur un calcaire marin et égal à 0 ‰. Le carbone à l'état gazeux, dissous ou solide va s'écarter considérablement de la valeur 0. Le CO_2 atmosphérique possède actuellement une valeur en $\delta^{13}\text{C}$ d'environ -7 ‰ et est ainsi appauvri en isotope le plus lourd. Les fractionnements isotopiques vont se produire entre la phase gazeuse de CO_2 et les différentes espèces de carbonates présentes dans l'eau sous forme dissoute (Tab. 1). Par rapport à la phase gazeuse de CO_2 , choisie habituellement comme la phase de référence, le composé H_2CO_3^* , premier produit de la réaction entre le CO_2 dissous dans l'eau et H_2CO_3 , est légèrement appauvri en ^{13}C , alors que les composés carbonate et bicarbonate sont enrichis d'environ 9 ‰, pour une température de 20 °C.

Composés (i)	ε_i 10°C	ε_i 35°C	ε_i 60°C
H_2CO_3 (=CO ₂ aq)	-1,13	-1,02	-0,93
HCO_3^-	9,62	6,90	4,59
CO_3^{2-}	7,46	5,77	4,44
CaCO_3 (calcite)	11,8	9,0	6,81

Tableau 1.
Facteurs d'enrichissement pour le système aqueux à trois températures. Les facteurs ε_i (‰) pour les composés *i* sont donnés par rapport au CO_2 gazeux. Ils indiquent des valeurs d'enrichissement (+) ou d'appauvrissement (-) du carbone dans le système CO_2 en l'équilibre avec le CO_2 gazeux (Pentecost, 2005).

Les isotopes du carbone sont donc différenciés entre les différents composés carbonés. La calcite précipitée à l'équilibre avec le composé gazeux de CO_2 est enrichie d'environ 11 ‰ alors que l'aragonite l'est encore d'avantage de 1,8 ‰ (Robinson and Clayton, 1969, in Pentecost, 2005). L'ensemble de ces enrichissements

est dépendant de la température à laquelle la réaction s'effectue. Par exemple, le facteur d'enrichissement isotopique $\epsilon_{\text{calcite-CO}_2\text{g}}$ est donné par la formule $1,435 * 10^6/T^2 - 6,13$ (Bottinga, 1968, *in* Pentecost, 2005). Ce facteur chute parallèlement à une augmentation de la température, jusqu'à environ 7 ‰ à 60 °C. Les sources du carbone des carbonates précipités dans les formations de travertin sont diverses, ce qui engendre une large gamme de compositions isotopiques. Les principales sources de dioxyde de carbone sont les calcaires marins ($\delta^{13}\text{C} \approx 0$ ‰), le CO_2 présent dans les horizons de sol ($\delta^{13}\text{C} \approx -15$ ‰), et le carbone magmatique ($\delta^{13}\text{C} \approx -7$ ‰).

Synthèse sur les isotopes stables du carbone et de l'oxygène des travertins s.l. :

Nous avons vu précédemment l'intérêt profond de l'analyse des isotopes stables du carbone et de l'oxygène dans l'étude des travertins. Certains auteurs s'appuient sur cette caractérisation géochimique pour différencier les dépôts de travertins s.s. des dépôts de tufs calcaires (p. ex. Gandin et Capezzuoli, 2008). Ainsi le soulignent parfaitement Viles et Pentecost (2007), les valeurs du $\delta^{18}\text{O}$ et du $\delta^{13}\text{C}$ obtenues de travertins et de tufs calcaires sont susceptibles d'apporter un certain nombre d'informations sur les conditions environnementales et climatiques au moment de leur dépôt. Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ reflètent les températures et la composition de l'eau au moment du dépôt et les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ sont utilisées principalement pour interpréter l'origine du dioxyde de carbone dissous dans l'eau de précipitation.

La figure A.28 présente un diagramme cartésien indiquant les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ (PDB) et de $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) obtenues à partir de différents travertins et tufs calcaires mondiaux, et la température maximale des eaux associées (lorsque celle-ci est connue). Cette synthèse bibliographique regroupe un certain nombre de sites sur lesquels les isotopes stables de l'oxygène et du carbone ont été analysés :

- Australie : *Queensland* (Ihlenfeld *et al.*, 2003) ;
- Belgique : *Treignes* (Janssen et Swennen, 1997) ;
- Brésil : *Itaborai Basin* (Sant'Anna *et al.*, 2004) ;
- Chine : *Baishuitai* (Liu *et al.*, 2003) ;
- Croatie : *Dinaric karst* (Horvatincić *et al.*, 2003) ; *River Krka* (Lojen *et al.*, 2004) ;
- Espagne : *Alicun de las Torres* (Jimenez de Cisneros *et al.*, 2006) ; *Urrea de Jalón* (Arenas *et al.*, 2000) ;
- Etats-Unis : *Yellowstone* (Friedman, 1970 ; Fouke *et al.*, 2000) ; *Pagosa Springs*, Colorado (Chafetz *et al.*, 1991) ;
- France : *Essarois* (inédit, cette étude), *Villards-Fontaine* (inédit, cette étude)¹ ;
- Grande-Bretagne : *River Lathkill* (Andrews *et al.*, 1994) ;
- Hongrie : *Egerszalók* (Kele *et al.*, 2008) ;
- Italie : *Bagni San Filippo* et *Bagnaccio* (Gonfiantini *et al.*, 1968) ; *Le Zitelle* (Chafetz et Lawrence, 1994) ; *Pontecagnano* (Anzalone *et al.*, 2007) ;
- Turquie : *Pamukkale* (Kele *et al.*, 2011).

¹Les résultats des analyses de la composition isotopique des carbonates provenant de ces deux sites sont donnés en annexe (cf. Annexe B).

Deux ensembles se dessinent dans la répartition des valeurs isotopiques, correspondant aux travertins *s.s.* d'une part, et aux tufs calcaires d'autre part.

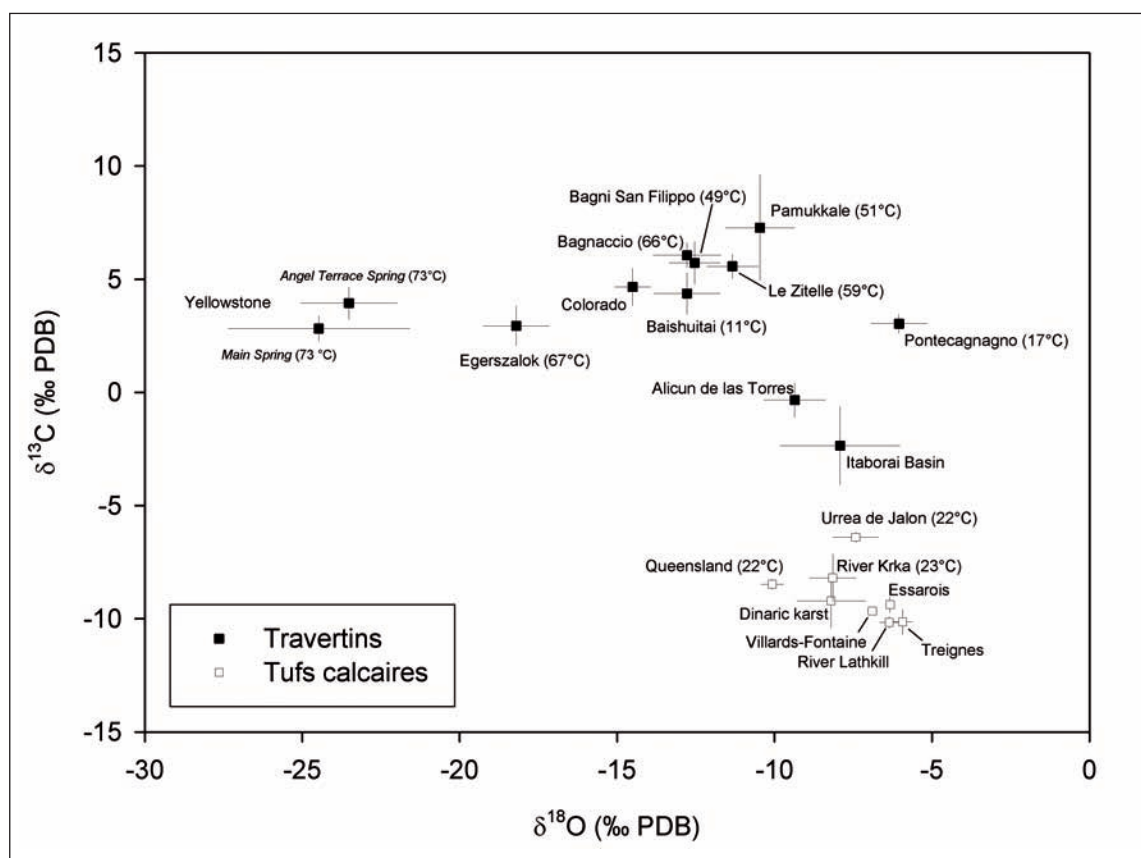


Figure A.28.

Diagramme $\delta^{18}\text{O}/\delta^{13}\text{C}$ (PDB) représentant les valeurs isotopiques de travertins et tufs calcaires mondiaux (voir les références bibliographiques dans le texte), et températures des eaux associées.

Les travertins présentent une gamme de valeurs en $\delta^{13}\text{C}$ comprise entre -2,3 ‰ (*Itaborai Basin*, Brésil) et 7,3 ‰ (*Pamukkale*, Turquie), avec une répartition principalement distribuée dans les valeurs positives, et des valeurs en $\delta^{18}\text{O}$ comprises entre -23,5 ‰ (*Yellowstone*, Etats-Unis) et -6 ‰ (*Pontecagnano*, Italie). La gamme de valeurs en $\delta^{13}\text{C}$ est caractéristique des dépôts de travertins *s.s.* (Gandin et Capezzuoli, 2008, p. 130) et reflète l'influence des formations calcaires marines sur la composition isotopique des eaux souterraines (Gonfiantini *et al.*, 1968 ; Friedman, 1970 ; Guo *et al.*, 1996). La gamme de valeurs en $\delta^{18}\text{O}$ reflète les températures élevées des eaux émergentes et leurs niveaux de saturation (Friedman, 1970 ; Guo *et al.*, 1996, Fouke *et al.*, 2000). L'augmentation des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ indique une évaporation de l'isotope léger ^{16}O et un refroidissement des eaux, tandis que les plus fortes valeurs en $\delta^{13}\text{C}$ reflètent une perte en isotope léger ^{12}C par le dégazage de CO_2 (Gonfiantini *et al.*, 1968 ; Chafetz et Lawrence, 1994).

Les tufs calcaires présentent des valeurs en $\delta^{13}\text{C}$ négatives, avec une gamme comprise entre -10,1 ‰ (*River Lathkill*, Angleterre ; *Treignes*, Belgique) et -6,4 ‰ (*Urrea de Jalón*, Espagne), et des valeurs en $\delta^{18}\text{O}$ comprises entre -10 ‰ (*Queensland*, Australie) et -5,9 ‰ (*Treignes*, Belgique). La gamme de valeurs négatives en $\delta^{13}\text{C}$ reflète la contribution du dioxyde de carbone des sols, phénomène connu depuis les premières analyses de dépôts de tufs calcaires (Pentecost, 2005, p. 140). Les valeurs isotopiques de l'oxygène et du carbone des tufs calcaires reflètent la composition de l'eau karstique parentale.

A.I.3. Le potentiel paléoenvironnemental des travertins *s.l.*

A.I.3.1. Le problème spécifique des laminations.

« Lamination is evidence of periodic change in sedimentation »

A. Pentecost (2005)

Le caractère laminé du sédiment est une caractéristique importante et primordiale d'un dépôt de travertins *s.l.* et représente souvent un trait remarquable du faciès et de la structure du sédiment. Cette lamination dans le travertin *s.l.*, qui peut être plane ou relativement ondulée, se présente sous différentes formes selon l'échelle d'observation du sédiment. En effet, la gamme des structures laminées s'étale depuis des lamines irrégulières, voire discontinues, visibles à l'œil nu mais non observables en lame mince à l'échelle microscopique, jusqu'à des très fines (micro)lamines, visibles exclusivement à l'échelle microscopique. **La lamination d'un sédiment est le reflet d'une variation périodique de la sédimentation et de la précipitation des carbonates formant le travertin.** Cette variation dans la précipitation des carbonates peut être générée par des facteurs essentiellement physiques, qui sont reliés à des variations climatiques susceptibles d'agir sur le comportement hydrodynamique et hydrologique de la source, ou à des épisodes évènementiels, tels que des événements de crue. Cette lamination peut également être la conséquence, directe ou indirecte, d'une certaine activité biologique, à différentes échelles.

Selon Pentecost (2005, p. 37), plusieurs types de lamination peuvent être distingués dans les séquences sédimentaires des travertins *s.l.* (Fig. A.29) :

- une **lamination répétitive** (*repetitive lamination*) : la séquence sédimentaire montre une succession de lamines identiques entre elles.
- une **lamination alternée** (*alternate lamination*) : la séquence sédimentaire montre une succession d'alternances entre deux types de lamines différents. Si les deux types de lamines sont d'égale épaisseur, la lamination alternée est dite **isopaque** (*alternate homopachous lamination*). Inversement, si les lamines sont d'épaisseur différente, la lamination alternée est dite **anisopaque** (*alternate heteropachous lamination*).

- une **lamination cyclique** (*cyclothemmic lamination*) : le travertin *s.l.* montre une répétition d'une même séquence plus ou moins complexe de lamines.

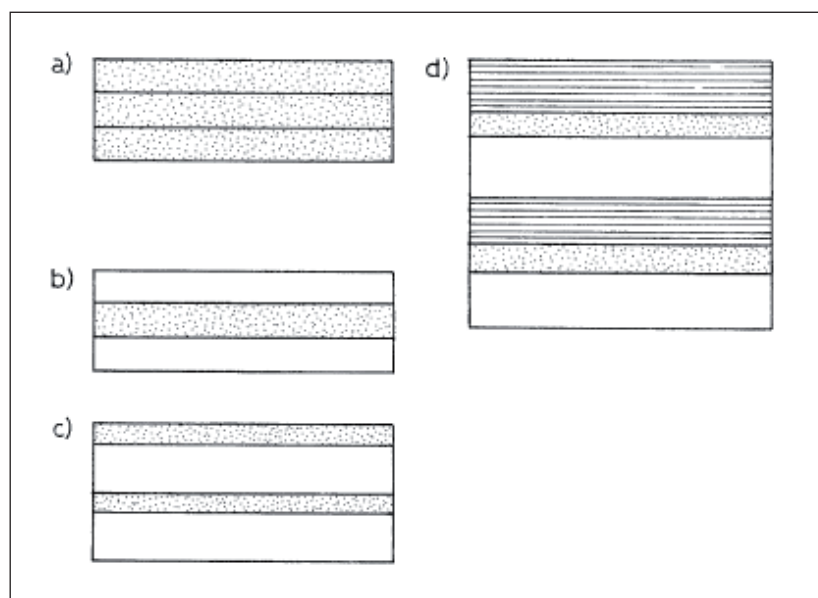


Figure A.29. Types de lamination des travertins *s.l.* :
a) répétitive, b) alternée isopaque, c) alternée anisopaque et d) cyclique
(Pentecost, 2005).

La saisonnalité dans la lamination (d'ordre pluri-millimétrique à pluri-centimétrique) des travertins *s.l.* a été étudiée sur plusieurs exemples de séquences laminées, que ce soit pour des tufs calcaires (Kano *et al.*, 2003 ; Arp *et al.*, 2001 ; Kawai *et al.*, 2009), pour des travertins (Chafetz et Folk, 1984 ; Guo et Riding, 1992) ou encore pour des spélétothèmes, c.-à-d. des travertins endokartsiques (Baker *et al.*, 2008, Treble *et al.*, 2003, 2005).

Concernant les tufs calcaires, Kano *et al.* (2003) ont suivi mensuellement la formation du dépôt carbonaté de *Shirokawa*, situé dans le Sud-Ouest du Japon, sur une période de trois ans (de mars 1997 à février 2000). En mesurant plusieurs paramètres physico-chimiques de la source responsable du dépôt (température, alcalinité, débit, pH, $p\text{CO}_2$, concentration en ions calcium, indice de saturation de la calcite) et de son environnement naturel (précipitations hebdomadaires), et en caractérisant les signatures pétrographiques et géochimiques des dépôts eux-mêmes, les auteurs ont pu démontrer le caractère annuel des lamines composant le dépôt, qui montrent une cyclicité alternée entre une lamine à cristallisation dense et une lamine à cristallisation poreuse. Les auteurs attribuent la lamine à cristallisation dense à la saison à fort taux de précipitation (été et automne, de juin à octobre) et la lamine à cristallisation poreuse à la saison de faible taux de précipitation (hiver et printemps, de novembre à mai). Ainsi, ils proposent une influence exclusivement inorganique sur la précipitation des carbonates, expliquant cette variation de cristallisation par une variation du taux de sédimentation/précipitation générée par les variations du débit de la source elles-mêmes reliées directement aux variations

pluviométriques (variabilité climatique, saisonnalité du climat).

Dans la même optique scientifique, l'observation et l'analyse, pendant une période de cinq années, du développement du tuf calcaire sur le site de *Shimokuraida*, dans le Sud-Ouest du Japon (Kawai *et al.*, 2006), amènent aux mêmes conclusions. Comme pour l'exemple du site de *Shirokawa*, la lamination biannuelle s'explique par les variations saisonnières du taux de précipitation du CaCO_3 , qui est en relation directe avec la température et le débit de l'eau. Dans la formation de ce tuf calcaire, un taux de précipitation élevé lors des saisons été-automne génère une lamine à cristallisation dense alors qu'un taux de précipitation plus faible lors des saisons hiver-printemps génère une lamine à cristallisation poreuse.

Le même phénomène de cyclicité alternée entre une lamine à cristallisation dense et une lamine à cristallisation poreuse a été étudié sur un dépôt de tufs calcaires du ruisseau de *Deinschwanger*, en Allemagne (Arp *et al.*, 2001). Dans ce cas, selon les auteurs, et à l'inverse de l'exemple des sites de *Shirokawa* et de *Shimokuraida*, les lames à cristallisation dense se forment pendant la saison hiver-printemps et les lames à cristallisation poreuse se forment pendant la saison été-automne. Les auteurs expliquent ce phénomène par l'influence de la précipitation organique en identifiant une relation entre la texture du sédiment (dense ou poreuse) et les communautés microbiennes présentes dans le sédiment. Ils proposent que la texture poreuse est due à la présence de films biologiques (*biofilms*) à population dominante de diatomées qui se développent en hiver-printemps, et que la texture dense est le résultat de l'influence de communautés cyanobactériennes. La variation saisonnière dans les communautés microbiennes qui contrôle la lamination d'un tuf calcaire a également été démontrée pour des dépôts situés en Belgique (Janssen *et al.*, 1999).

L'information primordiale qui ressort des ces études de la lamination d'un tuf calcaire est le caractère annuel de cette lamination. Celle-ci étant la conséquence d'une variation saisonnière, soit de l'hydrodynamisme de la source responsable du dépôt, soit de l'activité biologique des communautés microbiennes présentes et participant à la précipitation, chaque lamine est alors le reflet d'une saison (été-automne et hiver-printemps), et **chaque doublet de lames représente une période d'une année.**

En résumé :

- Sites de *Shirokawa* (Kano *et al.*, 2003) et de *Shimokuraida* (Kawai *et al.*, 2006) :

1 an = 1 doublet : lamine dense (été-automne) + lamine poreuse (hiver-printemps)

- Site de *Deinschwanger* (Arp. *et al.*, 2001) :

1 an = 1 doublet : lamine poreuse (hiver-printemps) + lamine dense (été-automne)

Dans une récente étude de plusieurs dépôts de tufs calcaires de la région du Sud-Ouest du Japon, six sites étudiés dont celui de *Shirokawa* vu précédemment, Kawai *et al.* (2009) reprennent les causes du caractère bian-nuel d'un doublet de lamines qui composent les dépôts. En analysant les paramètres physico-chimiques des sources responsables du dépôt calcaire et des variations hydrologiques, les auteurs statuent pour une influence inorganique dans les variations saisonnières de précipitation des carbonates, tout en n'excluant pas l'influence cyanobactérienne sur la texture des carbonates.

La lamination affectant certains dépôts de travertins a été étudiée sur quelques exemples de sites. Nous citons l'exemple du travertin formé par la source chaude de *Mammoth*, dans le parc de *Yellowstone*, aux Etats-Unis (Chafetz et Folk, 1984) ainsi que le cas du travertin qui se forme actuellement à *Rapolano Terme*, en Toscane, Italie (Guo et Riding, 1992).

Enfin, de nombreuses études du caractère laminé d'un sédiment ont porté sur les spéléothèmes, qui sont souvent considérés comme des travertins endokarstiques. Dans le cas de ces spéléothèmes, l'annualité des doublets de lamines qui constituent la séquence de croissance carbonatée est maintenant prouvée et pleinement reconnue. A travers un bilan portant sur l'annualité des lamines des spéléothèmes, Baker *et al.* (2008) recensent les quatre types de lamination possibles constituant les séquences sédimentaires : les lamines fluorescentes dues à des variations annuelles dans le taux de matière organique, les lamines pétrographiques qui montrent une lamination alternée suivant la cristallisation (texture et fabrique) du carbonate de calcium, la lamination alternée marquée par des doublets calcite/aragonite, et la lamination marquée par les variations saisonnières des teneurs en éléments traces.

Concernant les dépôts carbonatés en relation avec des structures humaines, la lamination de ceux-ci a été étudiée dans les aqueducs antiques de Nîmes (Fabre et Fiches, 1986) et de Fréjus (Dubar, 2006a, 2006b ; Bobée *et al.*, 2010). Dans les deux cas, que nous détaillerons dans notre définition de la notion de *travertin anthropique*, les auteurs attribuent la formation d'un doublet de lamines à une année et proposent ainsi une chronologie relative de la structure archéologique concernée.

Nous comprenons aisément que le caractère laminé d'un travertin *s.l.*, et particulièrement dans le cas d'un travertin *s.l.* préservé au sein d'une structure archéologique va avoir son importance dans nos enquêtes géoarchéologiques. En effet, **ce signal laminé géochronologique sera primordial pour la reconstitution de la chronologie relative de la (des) structure(s) archéologique(s).**

A.I.3.2. Reconstitution des paléoenvironnements et paléoclimatologie.

De nombreuses études ont pu démontrer le potentiel que représentent les formations travertineuses en tant qu'archives sédimentaires des paléoenvironnements. En parallèle des progrès effectués dans les méthodes de datation des séquences de travertin (datation par U/Th, radiocarbone), l'analyse du contenu biologique préservé dans les sédiments (fossilisation de la macrofaune, contenu malacologique, fossilisation de végétaux

supérieurs (Fig. A.30), conservation de traces de végétaux supérieurs (Fig. A.31), contenu palynologique, etc.) ainsi que les analyses géochimiques des isotopes stables (carbone et oxygène) offrent une certaine lumière sur les conditions environnementales du dépôt de travertin.



Figure A.30. Tronc d'arbre encroûté dans le travertin de Bagni San Filippo (Toscane, Italie) ; Longueur visible du tronc d'arbre = 2,50 m.



Figure A.31. Fantômes de végétaux supérieurs dans la tuffière de Rolampont (Haute-Marne).

• **Les travertins *s.l.*, enregistreurs d'évènements géotectoniques : une mémoire de la géodynamique.**

En tant qu'archives sédimentaires, les tufs calcaires, ubiquistes à la surface de la terre dans les nombreuses régions à substrat calcaire, et les travertins, majoritairement localisés dans des zones géodynamiquement très actives et à forte sismicité sont susceptibles d'enregistrer des évènements géotectoniques. Par exemple, les célèbres travertins de *Pamukkale* sont situés dans le bassin de Denizli, une zone à géodynamique très active où le risque sismique est jugé important (Fig. A.32). Les séismes y sont fréquents, notamment dans l'Antiquité, en témoigne l'histoire rapportée par Strabon de ce marchand d'esclaves logeant dans la cité voisine de *Carura*, surpris et englouti vivant, lui et ses esclaves, à la suite d'un tremblement de terre (*Géographie*, Livre XII, 8). Dans la cité antique de *Hiérapolis*, les séismes furent souvent destructeurs (en particulier ceux de 17 et 60 apr. J.-C. qui détruisirent, entre autre, le théâtre romain) avec les conséquences que l'on imagine sur les communautés humaines, et, comme le montre la large fracture qui entaille un long chenal/canal rempli de travertins (de date inconnue) (Fig. A.33), sur les structures hydrauliques, et plus généralement sur les formations de travertins.

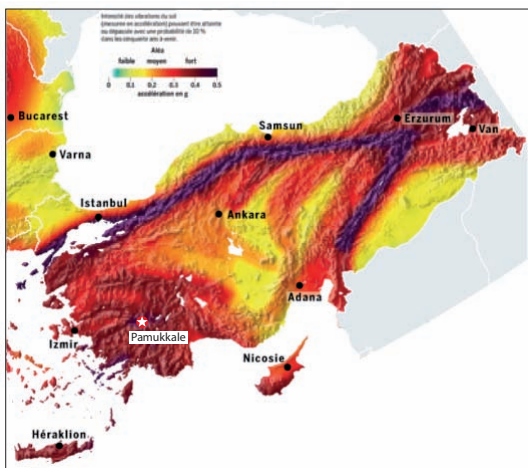


Figure A.32. Le site de Pamukkale sur la carte des aléas sismiques en Turquie.

Figure A.33. Canal de travertins à Pamukkale, fracturé à la suite de séismes (Pentecost, 2005).



Le second type d'événements catastrophiques pouvant être enregistrés par les travertins sont les éruptions volcaniques. Les panaches de cendres émis par ces éruptions, susceptibles de se propager dans l'atmosphère sur des distances considérables, peuvent être piégés dans les dépôts de travertin lors de leur retombée. D'un point de vue historique, pour le monde méditerranéen, nous pensons bien évidemment à l'éruption minoenne du volcan Santorin (Thera, Grèce) et à celle du Vésuve (Campanie, Italie) à l'époque romaine. La première, datée de *ca.* 1627-1600 BC (Friedrich *et al.*, 2006) et réputée pour être une hypothèse de la chute de la civilisation minoenne, et dont le panache de cendres atteignit la région de *Pamukkale* (Fig. A.34). La seconde, datée du 24 août 79 apr. J.-C. et célèbre pour avoir détruit et pétrifié les cités alentour (Pompéi, Herculaneum, etc.), a vu son panache de cendres se propager sur plus de 100 kilomètres vers le sud de l'Italie atteignant ainsi la cité de *Paestum* et ses dépôts de tufs calcaires (Fig. A.35). Dans ces deux exemples, l'épaisseur des téphras susceptibles d'être retombés au sein des dépôts de travertins *s.l.* est de 10 cm.

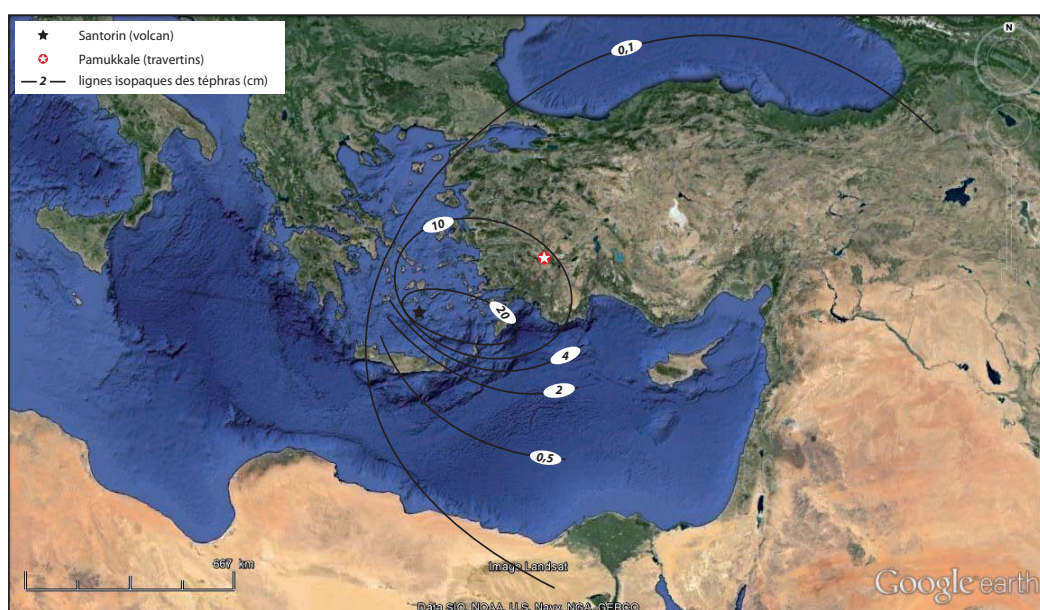


Figure A.34.
Le site de Pamukkale et la répartition géographique des cendres (d'après Friedrich, 2000) issues de l'éruption du Santorin (*ca.* 1627-1600 BC).

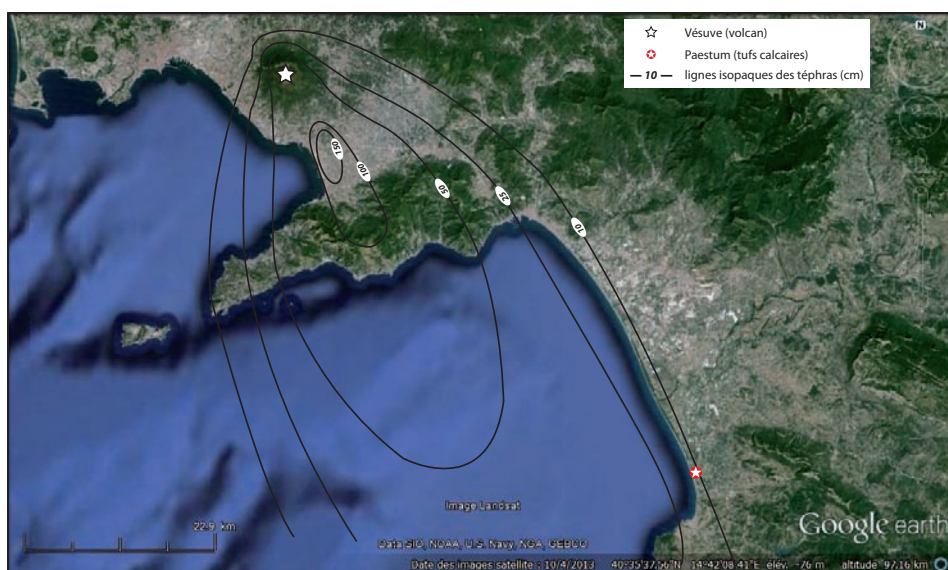


Figure A.35.
Le site de Paestum et la répartition géographique des cendres (d'après Sigurdsson *et al.*, 1985) issues de l'éruption du Vésuve (24 août 79 A.D.).

L'identification de marqueurs d'événements catastrophiques au sein de travertins *s.l.* répond à une double problématique, paléoenvironnementale d'une part et sociétale d'autre part, en abordant la réponse des sociétés humaines face à ces catastrophes. Ce potentiel d'archives sédimentaires reste encore, à notre connaissance, inexploité dans la communauté scientifique.

• Les travertins *s.l.*, archives paléoclimatiques :

Les travaux réalisés sur la séquence du tuf de Caours (Somme, France) par une équipe de recherche pluridisciplinaire (Antoine *et al.*, 2006) représentent l'exemple le plus complet et le plus remarquable associant reconstitutions paléoécologiques et occupations humaines, pour la période du paléolithique, liées au développement d'un tuf calcaire. Les auteurs ont pu étudier la faune malacologique préservée dans ce tuf essentiellement à faciès palustre et contenant de nombreux restes végétaux encroûtés, et ont pu ainsi mettre en évidence une séquence interglaciaire, suivi d'un optimum climatique, puis d'une phase de réouverture du milieu reflétant le déclin des conditions tempérées. La datation par la méthode U/Th de la séquence tuffeuse, ainsi que sa position au sein du système alluviale de la Somme et des conclusions des enquêtes bioclimatiques, ont permis de caler cette séquence parmi l'interglaciaire Eemien (*ca.* 120 ka BP), faisant des niveaux archéologiques mis au jour à Caours un exemple unique, dans la France septentrionale, d'occupation humaine contemporaine du dernier interglaciaire. L'analyse des isotopes stables et de la composition en éléments traces sur cette même séquence de Caours, ainsi que sur une autre séquence de tufs calcaires, également d'époque pléistocène, de la Celle-sur-Seine (Seine-et-Marne, France), a pu montrer que les variations des isotopes stables du carbone et de l'oxygène constituent des indicateurs fiables des variations climatiques au cours des phases interglaciaires (Dabkowski *et al.*, 2011, 2012). Ces mêmes indicateurs géochimiques avaient préalablement été utilisés avec succès, au cours d'études antérieures (Andrews, 2006), sur des séquences de tufs alluviaux d'époque holocène.

Concernant les dépôts de *travertins s.l. anthropiques*, Dubar (2006a, 2006b) propose une approche climatique à travers l'étude de la cyclicité de l'épaisseur des doublets de lamines constituant les dépôts carbonatés préservés dans l'aqueduc gallo-romain de Fréjus (Var, France, I^{er}-II^e s. apr. J.-C.). D'une épaisseur totale de 17 cm, le concrétionnement de l'aqueduc antique est constitué de 102 lamines, que l'auteur interprète comme le témoin de variations saisonnières biannuelles, par référence au régime hydrologique actuel des sources qui alimentaient le canal. L'analyse fréquentielle a permis de définir deux pics, l'un de haute fréquence à 7,1-7,3 ans et le second de basse fréquence à 39-43 ans, correspondant respectivement au mode actif et au mode passif qui caractérise l'Oscillation Nord Atlantique (NAO) dont le rôle est prépondérant en Europe occidentale.

A.I.4. L'empreinte de l'Homme dans les travertins *s.l.*

L'Homme interagit avec les travertins et les tufs calcaires par l'intermédiaire de facteurs directs (p. ex. une exploitation) ou indirects (p. ex. déforestation, acidification des sols, pratiques culturelles). Cette véritable empreinte que vont laisser les activités humaines dans la formation et le développement du travertin *s.l.*, en particulier sur la précipitation carbonatée proprement dite, va être un paramètre important dans notre nouvelle

définition de la notion de *travertin s.l. anthropique*.

A.I.4.1. Les travertins *s.l.*, sources de matériaux.

Les preuves archéologiques de l'utilisation de travertin *s.l.* sont nombreuses. Cette roche a pu être utilisée, depuis l'époque préromaine jusqu'à aujourd'hui, comme matériau de construction, et se retrouve ainsi employée sur de nombreux sites archéologiques, de contexte géographique et d'époque différents. On la retrouve également utilisée comme matériau primaire d'un procédé culinaire, pour la sculpture et la réalisation de blocs ornementaux, ainsi que pour quelques pratiques médicinales traditionnelles.

A.I.4.1.1. Les travertins *s.l.*, sources de matériaux pour la construction.

« J'admirerais bien plus que vous les eussiez faites en pierre de Tibur. »

Cicéron (I^{er} s. av. J.-C.)

Parmi les ressources de matériaux présentes à la surface de la Terre et exploitées par l'Homme, les travertins *s.l.* offrent certaines qualités mécaniques et esthétiques qui expliquent qu'ils ont été recherchés pour la construction, à des époques et pour des zones géographiques différentes.

A.I.4.1.1.1. Son utilisation à l'époque préromaine.

Par leur proximité avec certaines occupations humaines et très appréciés pour leurs qualités, autant mécaniques qu'esthétiques, et leur facilité à la taille, il semble évident que les travertins et les tufs calcaires furent utilisés très tôt en tant que matériau de construction. L'un de plus anciens exemples de bâtiments maçonnés avec du travertin date de la première dynastie d'Égypte, c'est-à-dire vers 3200 B.C. (Emery, 1961). En Europe centrale, plus particulièrement en Hongrie, les fouilles d'un cimetière de l'âge du Bronze (1000 BC) ont permis la mise au jour d'un bloc taillé en travertin et la mise en évidence de traces d'activité de carrière sur des travertins de la région (Dobosi, 2003). La cité grecque de *Poseidonia-Paistos* (qui deviendra plus tard la ville romaine de *Paestum*), en Italie méridionale, est elle-même installée sur un dépôt de tufs calcaires et les bâtiments qui composent la ville sont entièrement construits avec ce matériau, notamment les deux temples monumentaux datés du VI^e s. av. J.-C. (Fig. A.36). Suite à son abandon, les ruines de la cité (murs, rues et bâtiments) furent recouvertes par ce même type de dépôt carbonaté (Amato *et al.*, 2012). L'utilisation du tuf calcaire dans le gros oeuvre est également attestée à Ségeste (Sicile), pour la construction du temple grec, non terminé, daté du V^e s. av. J.-C. (Fig. A.37).

A.I.4.1.1.2. Son utilisation dans l'Antiquité romaine :

Les Romains ont utilisé le travertin à une très large échelle. Les grandes carrières de *Bagni di Tivoli* (région du *Latium*, Italie centrale) ont servi à alimenter Rome en ce type de matériau, la fameuse « Pierre de Tibur »



Figure A.36.
Temples grecs de Paestum (Italie, VI^e s. av. J.-C.),
construits en tuf calcaire.



Figure A.37.
Temple grec de Ségeste (Sicile, V^e s. av. J.-C.),
construit en tuf calcaire (« phytoherm tufa »).

(*Lapis tiburtinus*). Le travertin, directement acheminé par bateaux sur le Tibre, représentait un intérêt économique intéressant pour la construction. Le plus ancien exemple de travertin utilisé par les Romains provient de l'Arc d'Auguste, à Pérouse (Italie), daté du début du II^e s. av. J.-C. (Pentecost, 2005). A Rome, les exemples de bâtiments, publics et privés, édifiés en travertin sont nombreux et existent dès la fin du II^e s. av. J.-C. jusqu'à l'Antiquité tardive. Après l'incendie de 64 apr. J.-C., la reconstruction de la ville se fait très majoritairement avec du travertin. L'un des plus exceptionnels bâtiments de l'Empire romain, le Colisée (*amphitheatrum Flavium* = amphithéâtre Flavien), symbolise l'exploitation et l'utilisation importantes de ce matériau au I^{er} s. apr. J.-C. Sa construction débuta vers 70 apr. J.-C. sous l'empereur Vespasien, et son inauguration, alors que le bâtiment est encore inachevé, date de 80 apr. J.-C. Pouvant accueillir jusqu'à 50 000 personnes, le gros œuvre de sa structure (piliers, arches et voûtes) est composé essentiellement de blocs de travertin. Un soin particulier est consacré à l'agencement des blocs de travertin dans les voûtes des arches, à des fins décoratives (Fig. A.38). En effet, les blocs de travertin sont disposés de telle sorte qu'il existe un jeu visuel en rapport avec l'aspect laminé du travertin (Pentecost, 2005, p. 325).



Figure A.38.
Utilisation du *Lapis tiburtinus* dans les voûtes du Colisée
à Rome (I^{er} s. ap. J.-C.) ; notons l'effet visuel obtenu par le
jeu avec la lamination naturelle du travertin.

Ces quelques exemples témoignent d'une véritable économie du travertin au cours de l'Antiquité romaine. Si son utilisation est attestée tout au long de l'Antiquité et répandue géographiquement, certains aspects interrogent sur l'économie de ce matériau. La Villa d'Hadrien (*Villa Hadriana*, 117-138 apr. J.-C.), pourtant située

à seulement quelques kilomètres des grandes carrières de travertin de Tivoli, est caractérisée par l'absence de ce matériau pour sa construction. S'agit-il d'un quelconque désintérêt pour cette pierre à l'époque (le travertin n'est plus « à la mode ») ou cette pierre n'est-elle pas du goût de l'empereur Hadrien ? (Pentecost, 2005, p. 326).

Les tufs calcaires étaient utilisés plus communément dans l'architecture, comme en témoigne leur utilisation dans les murs des maisons à Pompéi (Pedley, 2009), dans les voûtes du Temple des Eaux à Zaghouan, en Tunisie (Fig. A.39), ou dans la construction de la voûtes de structures spécifiques de chauffe à Alésia, en Côte d'Or (Fig. A.40) ; le tuf calcaire est alors utilisé pour des moellons relativement petits et est probablement exploité très localement.



Figure A.39. Utilisation d'un tuf calcaire local dans les voûtes du Temple des Eaux de Zaghouan (Tunisie, II^e s. ap. J.-C.).



Figure A.40. Utilisation du tuf calcaire dans la construction de voûtes de structures spécifiques de chauffe à Alésia (Côte d'Or).

En Afrique du Nord, et plus particulièrement en Tunisie, à l'époque romaine, nous savons que les installations situées à proximité de formations travertineuses ont également largement exploité ce matériau. C'est le cas, par exemple, des thermes romains de Hammam Biadha (Tunisie occidentale), installés à proximité d'une source chaude associée à un dôme important de travertin, dans lequel des fronts de taille, dont les plus précoces datent probablement de la période antique, sont nettement visibles (Fig. A.41). Le bâtiment thermal antique est exclusivement construit avec le travertin situé à proximité immédiate du site. Sur le site de Hammam Mellègue (vallée de la Medjerda, Tunisie occidentale), les thermes antiques alimentés par l'eau de la source chaude située à proximité sont construits majoritairement en travertin. Sur ce site, le jeu visuel entre l'aspect laminé du travertin et la disposition des blocs, que l'on a déjà observé dans les portes d'accès du Colisée à Rome, est également mis en œuvre pour la construction des arches et des portes (Fig. A.42).

En dernier lieu concernant les exemples d'Afrique du Nord, sur le site de Jebel Oust, nous verrons que certains travertins déposés dans les structures antiques ont pu faire l'objet d'une récupération (cf. B.I.1.4.4), ou du moins de tentative de récupération, et sont réemployés parfois dans l'appareil de certains murs des thermes. De plus, comme nous allons le voir ultérieurement (cf. B.I.1.4.4), le profond aqueduc creusé dans le substrat rocheux, en l'occurrence dans le travertin déposé sur le versant avant l'occupation humaine dès le I^{er} siècle apr. J.-C., a amené l'exploitation des blocs de travertin issus de ce creusement pour construire les dalles de couverture de cet aqueduc.



Figure A.41. Carrière antique dans le dépôt de travertin de Hammam Biadha (Tunisie).



Figure A.42. Utilisation d'un travertin local dans les thermes antiques de Hammam Mellègue (Tunisie).

Parallèlement à cette utilisation du travertin *s.l.* pour le gros œuvre d'un bâtiment, il est très probable que les travertins *s.l.* ont été utilisés pour la fabrication de la chaux à l'époque antique, bien que les preuves archéologiques manquent encore. Le témoignage de l'agronome romain Palladius (IV^e s. apr. J.-C.), qui conseille que « pour faire de la chaux, on cuira de la Pierre de Tibur » (*De Re Rustica*, I, 10), coule parfaitement dans le sens de l'utilisation du travertin pour fabriquer la chaux.

A.I.4.1.1.3. Son utilisation de l'époque médiévale à aujourd'hui.

Au cours de ces périodes, l'utilisation du travertin *s.l.* semble se raréfier quelque peu dans toute l'Europe. Cependant, Couteaux (1969) nous apprend que des tufs calcaires sont utilisés pour les voûtes de l'abbaye médiévale d'Orval (Belgique) datée du XII^e s., ainsi que pour quelques autres églises de la région gaumaise (région wallonne, Belgique). D'autre part, les concrétions de l'aqueduc romain de Nîmes ont été réemployées au cours du Moyen Âge comme matériaux de construction pour diverses structures (Paillet, 1986). L'auteur produit un inventaire exhaustif et très intéressant des différents remplois du tuf provenant de l'aqueduc antique, en moellons dans le mur d'églises, de maisons ou de châteaux. Un des grands intérêts, précise cet auteur, réside dans les graffiti gravés sur les moellons de tuf de la chapelle Saint-Etienne de la Clastre (village de Saint-Hilaire d'Ozilhan, Gard), dont l'analyse iconographique permettra de préciser la fourchette chronologique de la construction de cette chapelle et donc de la destruction organisée des portions aériennes de l'aqueduc antique de Nîmes. En Angleterre, l'église médiévale de Brixnorth, à Northampton, est construite en partie par du tuf calcaire, d'origine inconnue mais probablement locale (Pentecost, 2005, p. 327). Du tuf est également utilisé pour refaire les voûtes du chœur de la cathédrale de Canterbury (Angleterre), suite à l'incendie qui l'affecte en 1174, ainsi que dans les cathédrales de Gloucester et de Worcester (Pentecost, 2005, p. 328). En France, dans le massif du Vercors, de nombreuses églises médiévales de villages et de villes sont construites en tuf calcaire exploité localement, par exemple à La Chapelle-en-Vercors ou encore à Barbières (Fig. A.43), reconstruite au XIX^e siècle.



Figure A.43. Eglise de Barbières (Drôme), construite en tuf calcaire de la région.

Gian Lorenzon Bernini, dit *Le Bernin* (1598-1680), entreprit de construire la colonnade de la place Saint-Pierre à Rome, dont les deux bras symbolisent l'accueil des pèlerins, exclusivement en travertin. Au cours du XIX^e s., quelques exemples d'églises construites en tuf calcaire subsistent, telle l'église Saint-Bruno à Grenoble, inaugurée en 1897. Au XX^e s., le travertin *s.l.* est encore largement utilisé pour la construction de bâtiments publics ou privés, la plupart du temps avec une exploitation locale du matériau : c'est le cas d'une partie de la station de métro de Piccadilly et de la Chambre du Sénat, à Londres, et des réfections de la Maison du Parlement à Budapest (Hongrie) (Pentecost, 2005, p. 329). En outre, il suffit de se promener dans certaines villes d'Italie (p. ex. Ancône, Pise, Rome, etc.) pour constater la place qu'occupe encore actuellement le travertin au sein de l'architecture moderne et/ou contemporaine. Lorsque celui-ci n'est pas employé dans l'ossature architecturale du bâtiment, il est utilisé, en particulier le véritable travertin italien au cours de la fin du XX^e s., pour les dallages muraux et les couvertures de façades, à des fins purement esthétiques. A cet égard, nous pouvons citer les exemples, parmi tant d'autres, du bâtiment de l'*Institut de zoologie* à Liège (Belgique), ou celui de *La Poste* situé dans le 20^{ème} arrondissement à Paris.

En dernier lieu, nous avons repéré un exemple, encore unique à ce jour à notre connaissance, de travertin utilisé directement comme enduit protégeant la façade d'une maison privée, dans le petit village de *Bagni San Filippo* (Toscane, Italie) (Fig. A.44). Si nous ne connaissons pas l'ingénierie employée pour la mise en place de cet enduit (détournement partiel et/ou ponctuel de la source ?), il est certain que le travertin peut apparaître comme un très bon enduit grâce aux qualités physico-chimiques que ce matériau offre (matériau poreux et imperméable, etc.).



Figure A.44. Utilisation du travertin en enduit sur le mur d'une maison, village de Bagni San Filippo (Toscane, Italie).

A.I.4.1.2. La diversité d'utilisation du travertin : son emploi dans certaines pratiques alimentaires et dans les domaines de la sculpture et de la médecine.

- Le procédé culinaire méso-américain de nixtamalisation* consiste à faire cuir des aliments dans de l'eau de chaux, dans le but de faciliter la digestion et d'améliorer le goût et la conservation des aliments. Cette pratique, encore usitée de nos jours dans certaines régions pour la fabrication de la pâte des *tortillas*, a pu être mise en évidence sur des sites archéologiques du Mexique, à proximité immédiate de complexes hydrothermaux. En effet, dans les populations Chupicuaro (Guanajuato, Mexique, 600 av. J.-C.-450 apr. J.-C.), il a été prouvé que ce procédé était communément utilisé localement, par des populations exploitant les dépôts carbonatés et les eaux thermales présents aux alentours (Maurer, 2008).

- L'utilisation du travertin est reconnu pour la réalisation de stèles funéraires étrusques, au VI^e s. av. J.-C., dans le bassin de Valdelsa, près de la ville Sienne, en Italie centrale (Gandin *et al.*, 2006). Pour ses qualités physiques et par sa grande ressemblance au marbre, le travertin est et a été largement utilisé dans le monde de l'art, pour la sculpture. Un bas-relief romain en travertin daté de l'époque de Néron et qui représente une famille romaine provient de la *Villa Volkonsky* à Rome (Pentecost, 2005, p. 336). Nous devons citer également le cas, encore unique à ce jour, d'utilisation d'un bloc de travertin de Tivoli dans le support d'une mosaïque datée du I^{er} s. av. J.-C. (Y. Coquinot¹, *communication personnelle*).

La Fontaine des Quatre-Fleuves (1648-51), au centre de la Place Navone à Rome, est construite par *Le Benin* qui utilise des gros blocs de travertin comme support des personnages surgissant magistralement de l'eau, et symbolisant chacun un continent. Achevée en 1762 par Niccolò Pannini, la *Fontaine de Trévi*, à Rome, représente un des plus beaux et célèbres exemples de l'utilisation du travertin dans l'art. Les dernières œuvres du sculpteur anglais Henry Moore (1898-1986), célèbre pour ses bronzes abstraits monumentaux, sont majoritairement exécutées en travertin provenant d'Italie, comme sa *Figure Etendue*, exposée devant le bâtiment de l'Unesco à Paris.

Les sources pétrifiantes sont beaucoup utilisées pour la confection de divers objets. Ces sources, dont le nom approprié serait plutôt sources encroûtantes², sont connues dans la région Auvergne, en France, aux alentours des sources du Mont Doré, de Saint-Nectaire ou encore de Saint Alyre (Grottes du Pérou), et en Isère sur le site de La Sône. Le principe consiste à laisser couler les eaux sur plusieurs échelles en bois, encroûtant les différents objets sculptés en forme d'animaux ou autres objets et étalés sur les barreaux. Le même procédé est également utilisé à proximité des sources chaudes de Carlsbad, en République Tchèque, et de Mammoth, dans le Wyoming (Etats-Unis).

¹Laboratoire du Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France (LC2RMF). L'étude des matériaux de la mosaïque a été présentée lors du 18^{ème} colloque d'*Archéométrie* du GMPCA (Groupe des Méthodes Pluridisciplinaires Contribuant à l'Archéologie) qui s'est tenu à Liège, du 11 au 15 avril 2011.

²Ces sources ne transforment pas la nature même de l'objet en pierre (*i.e.* une pétrification) mais enrobe l'objet d'une couche de pierre (*i.e.* un encroûtement).

• La boue carbonatée déposée par les sources chaudes est généralement utilisée pour des soins divers du corps humain. Ces dépôts, similaires à de l'argile que l'on se passe sur le corps en médecine thérapeutique et dermatologique, sont badigeonnés sur l'ensemble des parties du corps afin de soigner, adoucir et entretenir la peau. A *Bullicame* et à *Bagnaccio* (Latium, Italie), une coutume traditionnelle séculaire consiste à s'enduire de boue carbonatée (Fig. A.45) et s'immerger dans l'eau chaude pour contrecarrer certains problèmes liés aux articulations (A. Gandin¹, *communication personnelle*). L'utilisation de carbonate broyé provenant de spéléothèmes pour des pratiques médicales et rituelles ainsi que pour la cosmétique est maintenant très bien documentée (Shaw 1997, *in* Pentecost, 2005, p. 344).



Figure A.45. Bain de boue carbonatée à Bagnaccio (Latium, Italie).

Conclusions sur l'utilisation des travertins s.l. :

Comme pouvaient en témoigner les sources écrites laissées par les auteurs antiques, le travertin et le tuf calcaire ont été largement utilisés dans la construction romaine (Fig. A.46). Les travertins s.l. représentent une source de matériaux considérable pour différents usages, et à différentes époques. Ce constat représente un premier fait attestant de la relation étroite qui lie ces roches particulières à l'Homme.

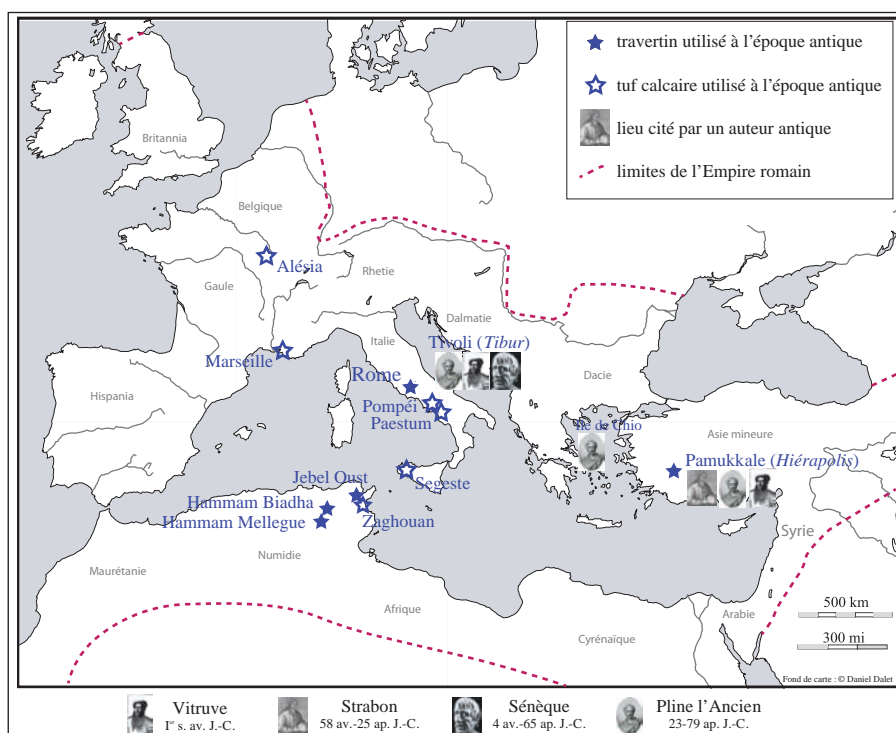


Figure A.46.
Carte des sites d'exploitation de travertin s.l. dans l'Empire romain et des lieux cités par les auteurs antiques au sujet des travertins.

¹Professeur de géologie à l'Université de Sienne, Italie.

A.I.4.2. L'impact anthropique sur le développement des tufs calcaires.

Les tufs calcaires représentent d'excellents enregistreurs biogéochimiques des conditions environnementales du milieu contrôlées plus ou moins directement soit par le climat (Goudie *et al.*, 1993) soit par l'homme (Casanova, 1981 ; Nicod, 1986). Ainsi, le déclin important de la croissance et le dépôt des tufs calcaires en Europe au cours de l'Holocène récent (depuis *ca.* 2500 BP) a souvent été attribué à l'Homme. Vingt-six hypothèses expliquant un déclin dans la production de tuf calcaire ont pu être proposées (Goudie *et al.*, 1993), dont dix-sept sont directement ou indirectement liées à l'activité humaine. Parmi les facteurs (Fig. A.47), il faut citer ceux qui ont une influence sur le débit des eaux : la déforestation, l'urbanisation, la surexploitation et le drainage entraînant l'abaissement des nappes ; et ceux qui provoquent un changement dans la composition chimique des eaux (acidification des sols).

<i>Facteurs de contrôle naturels (climatiques)</i>	<i>Facteurs de contrôle anthropiques</i>
Diminution des précipitations : baisse du débit et baisse de la turbidité des eaux	Agriculture : acidification des sols, accroissement des processus détritiques
Diminution de la température : réduction de l'évaporation, hausse de la solubilité du CO ₂	Déforestation : réduction du flux de CO ₂ dans le système, moins d'arbres susceptibles de créer des barrages, accroissement de la turbidité de l'eau réduisant la production algale
Accroissement des pluies : accroissement des événements de crues	Destruction directe des structures sédimentaires fragiles par le piétinement ou autres (bains, ...)
Développement progressif des tourbières et des sols podzoliques : acidification des eaux de surface	<i>Exploitation en carrière Installation de structures hydrauliques (canaux, aqueducs, citernes, ...) contraignant la précipitation carbonatée</i>

Figure A.47. Facteurs de contrôle du développement des tufs calcaires (d'après Goudie *et al.*, 1993).

L'augmentation de la production détritique liée à l'agriculture a probablement contrarié les facteurs biogéochimiques de contrôle de la précipitation des carbonates (Weisrock, 1986 ; Vaudour, 1986). Petit (2006) a pu démontrer la modification radicale de la dynamique sédimentaire alluviale de la Laignes, en Côte d'Or (France), lors de la mise en culture générale du bassin versant dès le début de l'époque gallo-romaine. Les apports sédimentaires détritiques, essentiellement argileux et issus des versants cultivés, ont pu fossiliser les dépôts alluviaux antérieurs constitués quasi-exclusivement de carbonates précipités (Petit *et al.*, 2006). En Australie, Carthew et Drysdale (2003) ont montré que l'incision du dépôt de tufs de *Davys Creek* (Nouvelles-Galles du Sud) était la conséquence de l'installation des populations européennes et du défrichement du milieu.

L'Homme intervient constamment sur ce type de milieu, et va perturber les conditions environnementales de dépôt du tuf calcaire, préalablement liées aux variations climatiques. Les pratiques culturelles et la déforestation mises en œuvre par l'homme augmentent l'érosion et l'acidification des sols et bouleversent différents facteurs hydrologiques, tels que le débit, la température et la nature de l'eau. Comme le souligne Hoffman (2005), « l'homme prend alors toute sa place dans cette longue chaîne des actions naturelles qui concourent à la mise en place du dépôt ». Le facteur humain va interrompre l'incidence du climat sur la formation des tufs calcaires, au moment où les conditions climatiques sont propices à la formation de ces dépôts. En résumé de tout cela, il apparaît clairement que **les activités humaines exercent une influence**, plutôt délétère, **sur les dépôts**, actifs et inactifs, **de tufs calcaires**.

A.II. LE RÔLE DE L'EAU DANS L'ANTIQUITÉ ROMAINE.

Cette partie consacrée au rôle et à la place de l'eau au sein des sociétés humaines, particulièrement dans l'Antiquité romaine, permet d'aborder l'étroite relation qui lie l'Homme à cette ressource, perceptible à différents niveaux, depuis une vision sociologique, culturelle et religieuse à un volet technologique et architectural. Ce travail sur l'eau dans les sociétés historiques est indispensable pour l'introduction de la notion de *travertins anthropiques*, directement reliée à l'eau et son exploitation.

A.II.1. La place de l'eau dans les civilisations historiques.

« L'eau est civilisation et, jusqu'aux Temps modernes, la religion en était partie intégrante. »

P. Gentelle (2003)

A.II.1.1. Des projets hydrauliques considérables.

L'eau est un élément fondamental dans le développement et l'essor des civilisations humaines. De tout temps, l'Homme a su créer avec l'eau une relation à la fois économique, basée sur les besoins et le progrès technique, sociale et/ou culturelle. Les sources archéologiques nous rapportent que, dès 3000 av. J.-C., la répartition par bassins des crues du Nil s'accompagnait de la création de registres des terres (Gentelle, 2003). Nous savons que les progrès de l'irrigation au Proche-Orient entraînent une forte croissance de la population. Des tablettes gravées en écriture cunéiforme relatent la dédicace d'un canal d'adduction d'eau à la déesse Lune, en 2100 av. J.-C., par Ur-Nammu (Gentelle, 2003). Au Mexique, dès le I^{er} millénaire av. J.-C., nous connaissons des traces de mises en culture de terrasses par les populations pré-aztèques, qui creusent et gèrent d'immenses réseaux de canaux d'irrigation (Caran *et al.*, 1996 ; Neely, 2002), canaux dans lesquels d'épais dépôts carbonatés se formeront et fossiliseront ainsi la morphologie et le tracé.

Selon des sources écrites, nous connaissons des canaux creusés vers 1700 av. J.-C. par Hammourabi de Babylone. En Chine, au cours du I^{er} millénaire av. J.-C., le *Zhouli* est un document officiel présentant les rites de la dynastie *Zhou* et dont certains chapitres peuvent être considérés comme un manuel d'hydraulique. En 610 av. J.-C., d'après Hérodote (*Histoire*, Livre II), le pharaon Nechao II entreprend le creusement d'un canal de navigation destiné à rejoindre les eaux du Nil à la mer Rouge, dont le projet initial remonte à l'époque de Sésostris III (-1878 / -1839), mais l'entreprise échoue. C'est le perse Darius I^{er}, roi d'Égypte au siècle suivant, qui achèvera cette œuvre gigantesque¹, laquelle sera ensuite l'objet de restaurations par le roi Ptolémée II en 283 av. J.-C. En Inde et en Chine, les constructions de ponts et de canaux deviennent communes dès le IV^e s. av. J.-C. (Gentelle, 2003).

En Grèce, il existe un dispositif hydraulique, daté de 1400/1300 av. J.-C. et de taille considérable, ayant servi de barrage pour protéger la population de la ville mycénienne de Tirynthe des crues de la Lakissa. Ce barrage

¹L'histoire de ce canal, auquel succèdera le canal de Suez, est également narrée par Théophile Gautier dans son article intitulé « l'Isthme de Suez », publié dans le journal *Le Moniteur Universel*, n°215, daté du samedi 3 août 1867.

(Fig. A.48), construit en terre, de 10 m de haut, large de 57 m en rive gauche et de 103 m en rive droite, possède les caractéristiques architecturales propres à la civilisation mycénienne, en particulier les murs cyclo-péens typiques de cette période.



Figure A.48.
Vestiges du barrage
mycénien de Tirynthe
(Argolide, Grèce).

En Grèce encore, en 480 av. J.-C., le roi perse Xerxès décide de faire creuser un canal dans le but d'éviter, lors du passage de son armée en Europe, de doubler la péninsule du Mont Athos réputée pour sa dangerosité. La construction de ce canal est précisément décrite par Hérodote (*Histoire*, Livre VII, 22-24), qui relate la grande difficulté de la tâche et remet en cause l'orgueil de Xerxès qui aurait du se contenter d'un *diolkos*, chemin dallé dont l'efficacité a fait ses preuves depuis déjà quelques siècles pour le transfert terrestre de bateaux à travers l'Isthme de Corinthe (Raepsaet, 1993). Mentionné également par Thucydide (Livre IV, 109), le canal fut tout de même achevé mais connu une durée de vie éphémère car, d'après des fouilles archéologiques récentes, il fut comblé quasi-immédiatement par des sédiments (Isserlin *et al.*, 1996).

Dès l'époque antique, l'Isthme de Corinthe a fait l'objet de tentatives de percement (Gerster, 1884), tentatives qui ont toutes échoué. L'historien antique Suétone (*Caes.*, XLIV) nous apprend que César projetait le creuse-



Figure A.49. Le diolkos antique de l'isthme de Corinthe.

ment de ce canal, avant que sa mort ne l'en empêche, et que Caligula eut cette même ambition (*Calig.*, XXI). Enfin, Néron entreprit ce projet qui restera inachevé mais laissera des traces profondes qui seront reprises par le creusement du canal moderne en fonction actuellement (Gerster, 1884). Néanmoins, en parallèle de ces tentatives de percement d'un canal, la mise en place d'un *diolkos* (Fig. A.49), qui permettait le transfert par voie terrestre des navires entre le golfe de Corinthe et le

golfe Saronique dans l'Antiquité, a largement prouvé son efficacité, comme le révèlent les rainures témoignant de son intense activité présentes sur les portions de son tracé encore visibles de nos jours.

A.II.1.2. La place de l'eau dans la civilisation romaine.

Les Romains entretiennent avec l'eau douce (c.-à-d. l'eau continentale, en opposition avec l'eau des mers et des océans) une relation privilégiée, couplant une perception souvent culturelle de l'élément sous ses diverses représentations géographiques et une vision économique et politique.

La légende liée à la fondation de la ville de Rome est un bel exemple. Tite-Live (*Histoires Romaines*, I, 4) nous retranscrit que, lors de l'abandon du berceau qu'occupaient Romulus et Rémus dans les eaux du Tibre, celui-ci était alors en crue et s'étendait largement hors de ses rives. Si bien que le berceau fut déposé dans des eaux stagnantes qui se retirèrent sans emporter ni noyer les deux frères. Pour reprendre l'expression de Malissard (2002), Rome fut ainsi fondée par « **un héros, non pas sauvé des eaux, mais sauvé par les eaux** ».

L'emplacement choisi par Romulus pour l'implantation de la ville de Rome n'était en fait qu'une zone marécageuse bordant un fleuve et dominé par sept collines. Afin de combattre les nuisances dues à l'insalubrité de cet environnement, il fallut assainir la plaine où le *forum* allait plus tard s'étendre, parallèlement à l'expansion de la ville. A l'époque de Tarquin l'Ancien, qui régna sur Rome de 616 à 575 av. J.-C., des premiers canaux à ciel ouvert sont ainsi créés afin de drainer les eaux jusqu'au Tibre (Tite-Live, *H.R.*, I, 38). Mais ces canaux commençant à entraver eux-mêmes l'expansion urbaine, Tarquin le Superbe (535-509 av. J.-C.) entreprit de les enterrer, travaux qui représentent alors les premiers rapports politiques et architecturaux de Rome avec l'eau (Malissard, 2002). L'importance et la pénibilité des travaux de ce grand égout souterrain est souligné par Tite-Live (*H.R.*, I, 56), faisant part également des travaux ayant lieu simultanément autour du Grand Cirque : « Deux ouvrages que la magnificence de nos jours est à peine parvenue à égaler ». La création de ce grand égout souterrain, qui aboutira à la célèbre *Cloaca Maxima*, fut une entreprise longue et épuisante (Pline l'Ancien, *H.N.*, XXXVI, 5), mais représente sans doute l'origine de la formidable compétence des Romains dans l'art de conduire et gérer l'eau.

A.II.2. Les aqueducs romains.

« Ces aqueducs qui, comme des rayons aboutissant à un même centre,
amènent les eaux du peuple-roi sur des arcs de triomphe »

Chateaubriand (1809)

La civilisation romaine fut le berceau de la construction d'aqueducs considérables par leur nombre et par leur longueur, particulièrement pour alimenter leur capitale, Rome. Si l'on peut penser comme Frontin, curateur des eaux* à la fin du I^{er} s. apr. J.-C., qui ne manque pas d'admiration pour ces aqueducs : « Aux masses si nombreuses et si nécessaires de tant d'aqueducs, allez donc comparer des pyramides qui ne servent évidemment

à rien ou encore les ouvrages des Grecs, inutiles, mais célébrés partout ! » (*Des aqueducs de Rome*, XVI), il ne faut pas omettre que les Romains ont largement emprunté les techniques étrusques et grecques pour le tracé et la construction de ces structures hydrauliques (Grimal, 2004). Pour alimenter la « ville éternelle », la construction de neuf principaux aqueducs fut entreprise, étalée de - 312 à + 52 (Bonnin, 1984). Mais la construction de ces imposants ouvrages hydrauliques s'est également propagée dans l'ensemble de l'Empire romain, jusqu'aux plus lointaines provinces.

Un certain soin est toujours accordé au point de départ de l'aqueduc, au niveau du captage des eaux. Lorsqu'il s'agissait de capter les eaux d'une rivière, un canal de dérivation à l'endroit le plus propice de la berge suffisait pour conduire l'eau dans l'aqueduc. Dans le cas du captage d'une source, les eaux étaient la plupart du temps reçues dans un bassin, agrémenté ou non par des structures annexes telles que des fontaines, des drains ou des galeries souterrains afin de réduire au besoin les pertes ou rassembler plusieurs jaillissements. Une fois ces eaux rassemblées, il suffisait de les conduire jusqu'à l'endroit désiré. Pour conduire les eaux depuis le *castellum* de départ jusqu'au *castellum* d'arrivée, il était nécessaire de contrôler à la fois la pente de l'aqueduc ainsi que le débit. La réalisation des aqueducs a progressivement bénéficié des progrès techniques, aboutissant à des ouvrages d'art que sont :

- le tunnel, permettant d'établir un canal traversant un massif en relief ;
- le siphon inversé, mettant l'eau en charge pour passer un vallon ;
- le canal surélevé sur mur ou sur arcades (p. ex. le Pont du Gard), permettant de franchir un vallon, sans mise en charge.

La pente d'un aqueduc trouve son importance dans la détermination de la vitesse de l'eau, et par conséquent du débit. Les ingénieurs romains possédaient des notions empiriques sur la relation entre la pente et le débit. Celles-ci leur permettaient de fixer une valeur minimale à la pente nécessaire à assurer un écoulement d'eau suffisant.

Si les aqueducs fascinaient par leur grandeur et leur grande utilité pour le développement d'une ville, ils présentaient néanmoins quelques tares et défauts, notamment dans leur construction même et dans leur entretien au cours du temps. Des observations archéologiques nous ont appris que quelques défauts pouvaient apparaître au sein de ces aqueducs. L'aqueduc de Chercell (Algérie) a connu plusieurs réfections et changements de parcours du fait de sa large fragilité (Leveau et Paillet, 1976), et des erreurs dans sa construction ont entraîné l'abandon de l'alimentation en eau des parties hautes de la ville. A ces problèmes de construction qui se retrouvent dans plusieurs aqueducs, viennent s'ajouter les problèmes liés à la maintenance de ces ouvrages. En effet, au bout de quelques années de fonctionnement, les éléments constitutifs des aqueducs montraient certains signes de faiblesse : le bois pouvait travailler, les canaux étaient susceptibles de fuir, les arches et les ponts glissaient parfois sous l'action des éléments naturels. De plus, le *specus*, complètement solidaire de l'infrastructure sur laquelle il reposait, était extrêmement susceptible de s'effriter ou se lézarder face aux écarts de température et autres facteurs. Ainsi, de nombreuses réparations étaient nécessaires pour continuer d'assurer l'étanchéité de la structure. Cependant, il existait toujours ici et là des imperfections et les exemples

de fuites ou de suintement ne sont pas rares, « A la porte Capène, à l'endroit où la route est humide des pleurs que distille la voûte » nous conte le poète Martial (*Epigrammes*, III, 47, 1). Une arche de l'*aqua Virgo*, l'un des grands aqueducs de Rome, était appelée *Porta pluens* (« la porte qui pleut ») car sous cette arche tombait une pluie continuelle et les glaces hivernales menaçaient même les citoyens (Martial, *Epigrammes*, 4, 18).

Parmi ces problèmes de maintenance et d'entretien, lors de l'utilisation d'une eau calcaire, les Romains devaient faire face aux dépôts qui venaient obstruer, partiellement ou complètement, les conduites. Un curage était alors indispensable pour un fonctionnement pérenne de la conduite et pour éviter une chute considérable du débit. Nous détaillerons quelques exemples d'aqueducs encroutés lors de la définition des *travertins et tufs calcaires anthropiques* (cf. A.III.2.3).

A.II.3. Le culte des eaux et des sources dans le monde romain.

**« Nous vénérons la source des grands fleuves ; au point où tout à coup de dessous terre
une rivière a fait éruption on dresse des autels ; toute veine d'eau thermique a son culte,
et la sombre teinte de certains lacs ou leurs abîmes sans fond les ont rendus sacrés. »**

Sénèque (I^{er} s. apr. J.-C.)

L'archéologie et l'épigraphie en particulier se sont beaucoup intéressées au culte de l'eau dans la civilisation antique romaine. À côté des constructions technologiques que sont les aqueducs et les thermes, il est vrai que les monuments cultuels liés à l'eau, et particulièrement aux sources, représentent un des chaînons importants de l'étroite et complexe relation qui existe entre les Romains et cet élément naturel. Nous nous concentrerons ici aux sanctuaires associés à une source naturelle, d'où l'eau sort naturellement et dont le griffon est susceptible d'être aménagé, au contraire de Bourgeois (1992) qui, dans son étude vouée aux cultes gallo-romain de l'eau et les monuments associés, exclue de la catégorie « sanctuaire de source » les lieux présentant un quelconque aménagement au niveau même de l'évent. Nous nous rapporterons aux études récentes concernant cette problématique de sanctuaire de source, et plus généralement de culte des eaux, en nous restreignant chronologiquement au monde romain. Et, à ce sujet, les interrogations demeurent multiples et les ambiguïtés bien présentes selon les spécialistes de la question. Notre propos n'a pas vocation à recenser les nombreuses publications proposées concernant le monde religieux dans l'Antiquité gréco-romaine, qu'elles soient à sensibilité archéologique et/ou historique ; il suffit de voir par exemple pour la Gaule romaine le volume qu'Albert Grenier a consacré aux *Monuments des eaux* (Grenier, 1960), ou, pour l'Antiquité grecque, l'étude proposée par René Ginouvès sur les *Dieux guérisseurs et sanctuaires de sources dans la Grèce antique* (Ginouvès, 1992). Cependant, il nous semble particulièrement nécessaire de s'intéresser aux recherches récentes concernant la religion romaine et aux problématiques soulevées par les différentes approches. Les problématiques liées au culte des eaux et aux cultes des sources dans le monde romain, et les interrogations qu'elles posent, sont parfaitement soulignées par John Scheid, titulaire de la chaire *Religion, institutions et sociétés de la Rome antique*

au Collège de France, dans le cours qu'il a consacré au culte des eaux et des sources dans le monde romain¹, cours que l'auteur introduit par le commentaire de Servius de l'expression *fons sacer* utilisée par le poète Virgile dans l'Énéide : *Nullus enim fons non sacer*, « il n'y a de source en effet qui ne soit sacrée » (*Énéide*, 7, 84). Ainsi, pour citer le cours de J. Scheid, ce commentaire de Servius « met à l'aide le lecteur moderne » et amène un certain axiome, à savoir que « la source est sacrée, on vénère et on supplie le sacré qui est dans l'eau pour obtenir un bienfait, généralement la santé ». C'est à partir de cette formule que J. Scheid développe un ensemble d'arguments par le biais de témoignages historiques, de réalités archéologiques, et d'une remise en question de la vision « romantique » d'un culte de l'eau influencée par les courants de pensée du XIX^e siècle. A travers une promenade sacrée nous menant des sources du Clitumne (Ombrie, Italie) au sanctuaire de Bath (Angleterre), après quelques étapes dans des lieux sacrés de la Gaule romaine, une mise en lumière est faite sur la complexité des interprétations d'un lieu de culte caractérisé par la présence d'une manifestation naturelle hydrique. Pour synthétiser la (les) problématique(s) soulevée(s) par le sujet « sanctuaires et sources », il est nécessaire d'avoir en mémoire le postulat exprimé ainsi : « La présence d'eaux dans l'espace consacré à la divinité ou sur ses marges, sous quelque forme que ce soit – fontaine, captage, puits, ruisseau, lac ou marais – ne suffit pas à en faire un « sanctuaire des eaux » (De Cazanove et Scheid, 2003, p. 5).

Au sein de cette problématique, le site tunisien de Jebel Oust apparaît comme un parfait exemple susceptible d'illustrer un cas de sanctuaire de source, avec un évent thermal exploité dès le début de notre ère, comme le montre les premières investigations menées récemment sur ce site (Ben Abed et Scheid, 2005).

Ainsi, l'étude du culte des sources et du culte des eaux dans le monde romain s'est et doit encore se nourrir d'exemples archéologiques et de témoignages épigraphiques et historiques. Nous verrons à travers l'exemple du site de Jebel Oust ce qu'apporte comme arguments à l'identification d'un culte de source à l'époque romaine notre approche géoarchéologique.

A.II.4. Les bains et les pratiques balnéaires dans l'Antiquité gréco-romaine.

**« Les bains, le vin, le sexe nous ruinent la santé,
mais la vie, c'est les bains, le vin, le sexe »**

Graffiti romain, anonyme

Il existe une très abondante bibliographie thermale, qu'il s'agisse de recueil de textes, d'articles spécialisés, ou de synthèse régionale ou générale. Au cours du XX^e siècle, de nombreux édifices ont été mis au jour sur l'ensemble du bassin méditerranéen, mais, comme le souligne H. Broise dans son introduction à l'ouvrage collectif consacré au *Bain Collectif en Égypte*, ce n'est que dans les années 80 qu'un véritable intérêt pour la pratique du bain dans l'Antiquité se manifeste (Broise, 2009, p. 9). Plusieurs monographies vont ainsi voir le

¹ Les cours sont disponibles en téléchargement libre sur le site Internet du Collège de France : <http://www.college-de-france.fr/site/john-scheid/>; le cours 2007/2008 du professeur s'intitule « Le culte des eaux et des sources dans le monde romain, un sujet problématique, déterminé par la mythologie moderne »

jour, telles que celles de E. Brödner (Brödner, 1983), de W. Heinz (Heinz, 1983), puis dans les années 90 celles d'I. Nielsen (Nielsen, 1990), de F. Yegül (Yegül, 1992) et de G. Fagan (1999). La décennie suivante voit la publication de synthèses régionales, en particulier celle d'Y. Thébert sur les thermes d'Afrique du Nord (Thébert, 2003), et d'A. Bouet sur ceux de Narbonnaise (Bouet, 2003). Parallèlement, depuis plusieurs années se sont organisés plusieurs colloques, à Rome (1988) sur les thermes collectifs d'Italie et d'Afrique du Nord, à Bath (1992) avec une approche essentiellement sociologique, à Madrid (1996) concernant la Péninsule Ibérique, puis à Gérone (1999) pour les découvertes récentes effectuées en Espagne, et enfin à Rome de nouveau (2004) sur les bains en Italie de l'Antiquité au Moyen Âge.

L'étude des pratiques balnéaires s'appuie ainsi depuis plusieurs années sur des recherches bénéficiant de plusieurs approches, que celles-ci soient historiques, sociologiques, architecturales, ou archéologiques. Néanmoins, pour citer à nouveau H. Broise (2009, p. 11), les recherches menées sur le bain collectif, notamment en Occident et au Maghreb, s'inscrivent la plupart du temps dans le cadre d'une période historique limitée, de telle sorte que les périodes de transition, et par là l'évolution des pratiques thermales au cours du temps, s'en trouvent plus ou moins occultées. Les prémices d'une nouvelle approche, réunissant plusieurs spécialistes des différentes périodes, se sont manifestés lors du colloque de Rome en 2004 pour l'Italie méridionale, mais c'est véritablement avec le programme *Balnéorient*, débuté en 2006¹, qu'une approche diachronique du « phénomène thermalisme » va considérablement se développer. Cette nouvelle approche sera illustrée lors du colloque organisé à Alexandrie en 2007 et consacré au *Bain collectif en Égypte*, et davantage encore lors de celui organisé à Damas en 2009 (« *Balaneia, Thermes et Hammams, 25 siècles de bain collectif* », 3^{ème} colloque *Balnéorient*, IFPO/DGAMS, Damas, 2-6 novembre 2009²), premier colloque à proposer une vision diachronique de l'évolution des pratiques du bain à travers des problématiques archéologiques, géoarchéologiques, historiques, sociologiques et sociétales.

Pour compléter cet état des lieux des recherches menées sur les pratiques du bain, il nous faut parler d'un axe spécifique consacré au thermalisme à vocation « thérapeutique », qui se développe notamment au sein des recherches menées par l'Institut de Recherche sur l'Architecture Antique, sous l'impulsion d'H. Broise. Cette récente approche a pour ambition de cerner, à travers l'architecture et l'organisation interne des édifices, la spécificité des thermes « curatifs » exploitant des eaux thermales chaudes. Elle intègre l'abondante littérature antique portant à ce sujet, et, surtout, elle tend également à s'appuyer sur la réinterprétation d'un corpus d'édifices fouillés ou dégagés de manière exhaustive tels que ceux de Bath (Angleterre), Badenweilern (Allemagne), Aquae Flavianae (Algérie) et Hammat Gader (vallée du Yarmouk, Israël), auxquels viennent s'ajouter des monuments en cours d'étude comme ceux d'Allianoi (Turquie) et de Jebel Oust (Tunisie). Les thématiques ainsi abordées sont à rapprocher des recherches menées sur les sanctuaires de sources et le culte des eaux, dont les enjeux multiples ont été développés précédemment (cf. A.II.3).

¹Le projet *Balnéorient*, retenu par l'Agence nationale de la recherche (ANR) et piloté par la Maison de l'Orient (coord. : M.-Fr. Boussac), se propose d'étudier les pratiques du bain collectif au Proche-Orient, en Égypte et dans la Péninsule Arabique.

²Les organisateurs du colloque de Damas sont : M. al-Maqdissi (Directeur des fouilles et des études archéologiques/DGAMS Damas), M.-F. Boussac (responsable du projet *Balnéorient*/Université Paris-Ouest Nanterre/Maison de l'Orient et de la Méditerranée) et T. Fournet (IFPO, MAEE-CNRS).

Dans ce manuscrit, nous verrons les apports d'une approche géoarchéologique à l'étude diachronique, fonctionnelle et architecturale des thermes romains de Jebel Oust (cf. B.III). Dans cette perspective, une synthèse certes succincte des pratiques du bain dans l'Antiquité gréco-romaine et de son évolution dans le temps, en parallèle de l'évolution des édifices thermaux et des progrès techniques mis en œuvre, est indispensable et à la mise en application de notre approche à Jebel Oust et, plus généralement, à l'adoption de la notion de *travertins anthropiques*.

A.II.4.1. Les pratiques du bain à l'époque romaine.

A.II.4.1.1. Des bains hellénistiques aux bains romains.

Pour reprendre les écrits de Y. Thébert (2003, p. 45) « il est bien évident que les hommes n'ont pas attendu la création d'édifices thermaux pour se nettoyer ou se baigner » ; nous restreindrons nos propos ici au monde gréco-romain « où s'élabore un nouvel art du bain » à l'époque classique avant « l'explosion thermique » qui caractérise la civilisation romaine. Nous verrons l'évolution des pratiques du bain qu'accompagnent les transformations architecturales pour arriver aux thermes romains et leurs spécificités, en nous appuyant particulièrement sur les travaux de synthèse de A. Bouet (2003) et de Y. Thébert (2003).

Les pratiques balnéaires dans la civilisation romaine trouvent leur origine dans la culture grecque. Les premiers témoignages sur le bain remontent à l'époque archaïque (620-480 av. J.-C.), au cours de laquelle sont pratiqués, dans la péninsule grecque, les bains de propreté en mer ou en rivière. Des bains de délassement et de plaisir, parmi lesquels la nage, existent également. Sans doute dès cette époque, puis à l'époque classique (V^e-I^{er} s. av. J.-C.), le bain est étroitement associé au sport et est une des pratiques essentielles du *gymnase*. A l'époque classique, le bain se ferait dans un simple point d'eau, à l'air libre. Les Grecs s'exerçaient au sport dans le gymnase et la pratique du bain se faisait par affusion* autour d'une vasque circulaire sur pied (*labrum*) ou dans des baignoires individuelles¹. A la fin du V^e s. av. J.-C., la morphologie et la structure des gymnases évoluent. Le bain se pratique alors dans une pièce isolée de l'extérieur, le *loutrôn*, qui voit l'installation de cuves quadrangulaires agencées le long des parois et directement alimentées en eau froide. C'est au III^e s. qu'apparaissent dans le gymnase les étuves chauffées artificiellement à partir d'une chambre de chauffe (Bouet, 2003, p. 7).

Les bains publics - regroupés sous le terme général de *balanéion* - apparaissent dès le VI^e s. av. J.-C., avec la mention de bains dans la cité de Sybaris mais dont aucun vestige ne subsiste, et se développent au cours du siècle suivant. Le schéma du bain hellénistique du III^e s. au I^{er} s. av. J.-C. a été éclairci et précisé grâce à l'étude d'H. Broise sur les découvertes effectuées en Sicile et dans la péninsule italienne (Broise, 1994), par exemple les thermes de Syracuse et Mégara en Sicile, ou ceux de Musarna en Etrurie. Il existe ainsi, dès le II^e s., **un art du bain** profondément unitaire qui se maintiendra bien après cette date. Les bains hellénistiques comprennent deux circuits bien distincts selon la nature et la fonction du bain. Un premier itinéraire correspondant au bain

¹A l'heure actuelle, aucune source archéologique ou historique ne mentionne l'utilisation d'eau chaude pour la pratique du bain à cette période (Bouet, 2003, p. 2).

de propreté est constitué d'une étuve directement chauffée par le biais d'un canal souterrain (c.-à-d. par « en dessous ») et d'une rotonde dans laquelle se trouvent les cuves traditionnelles. Le second itinéraire, celui du bain de délasserment, se compose d'une vaste pièce quadrangulaire munie d'une grande baignoire chauffée également « par en dessous » qui servait au bain collectif par immersion et d'un petit bassin installé dans un angle de la pièce (ou dans une pièce indépendante) qui servait de pédiluve.

Il faut attendre le I^{er} s. av. J.-C. pour voir apparaître, dans les thermes, un nouveau mode de chauffage qui remplacera le système de chauffage « par en dessous » des époques précédentes, l'hypocauste, dont le principe consiste à chauffer l'air ou l'eau d'une pièce par l'intermédiaire d'un sol suspendu (c.-à-d. un sol soutenu par des pilettes = *suspensura*) et qui va permettre d'accroître considérablement le degré de chaleur potentiel tout en le contrôlant. Les spécialistes des études thermales parlent même de « **révolution de l'hypocauste** » (p. ex. Thébert, 2003). Cette révolution du mode de chauffage s'est déroulée en deux étapes : la création d'une circulation de la chaleur sous la quasi-totalité de la surface concernée (création de l'hypocauste *stricto sensu*) puis l'extension de la capacité de chauffe aux parois des pièces. L'introduction de ces nouvelles techniques engendre un certain nombre de mutations architecturales dans les édifices thermaux, modifiant radicalement les conditions de la pratique du bain et contribuant à l'émergence d'un espace balnéaire nouveau. Le baigneur se déplace maintenant dans les thermes entre deux espaces chauffés, transpirant d'abord dans le *tepidarium**, puis se rendant dans le bassin chaud, le *caldarium**.

Le changement majeur du I^{er} s. av. J. -C. est l'apparition du bain froid en fin de circuit thermal, le *frigidarium**, qui permet au baigneur de subir un choc thermique. A partir de cette nouveauté, le déroulement du bain va suivre un protocole classique qui voit le baigneur se déshabiller dans un vestiaire (*apodyterium**), s'échauffer soit dans la palestine soit dans une pièce tiède, le *tepidarium*, puis se nettoyer au strigile dans le *destricatrium* et s'oindre d'huile, avant de passer dans l'étuve (*laconicum**) et dans la salle du bain chaud (*caldarium*). Son chemin se terminant dans la salle du bain froid, le *frigidarium*, ou dans la *natatio*, à l'extérieur du bâtiment. Si le cheminement et la pratique du bain sont relativement fixés, des aménagements interviendront au niveau de l'édifice. Progressivement, le nombre de salles chauffées au sein des bâtiments thermaux va augmenter, ce qui provoque l'apparition de nouveaux types de plans. Avec l'association dans un même édifice de bains chauds, tièdes et froids, le dessin d'ensemble demeure un enchaînement des bains de propreté et de délasserment qui s'insère dans une classification typologique établie selon le mode de déplacement de l'utilisateur ou selon le plan de l'édifice. Le déplacement du baigneur peut suivre soit un itinéraire rétrograde qui le voit, après être parvenu au *caldarium*, revenir sur ses pas et parcourir en sens inverse les salles chauffées pour gagner le secteur froid, soit un itinéraire continu dans lequel il n'est jamais obligé de faire marche arrière. Cet itinéraire continu peut être symétrique lorsque qu'un dédoublement de certaines salles permet de diviser le flot de baigneurs, ou circulaire lorsque tous les baigneurs suivent le même parcours. Une classification typologique est également proposée selon le plan des édifices thermaux. Deux grandes catégories se distinguent : les plans symétriques, pour lesquels les pièces sont dédoublées de part et d'autre d'un axe le long duquel s'alignent les bains chauds et froids, et les plans non symétriques. Ces derniers, qui concernent la majorité des édifices, obéissent à un mode d'organisation qui reflète un choix dans l'agencement des salles chaudes et leur articu-

lation avec les salles froides. Le plan peut être ainsi soit linéaire, où les salles chauffées et le *frigidarium* sont sensiblement alignés, soit orthogonal, où les salles chauffées forment un angle droit avec le *frigidarium* ou entre elles, soit circulaire où les salles sont disposées en anneau.

A.II.4.1.2. Le cas spécifique de l'exploitation d'une eau chaude.

L'exploitation d'une source chaude pour l'alimentation en eau d'un édifice thermal se retrouve dans l'ensemble de l'espace géographique de l'Empire romain. Les exemples qui ont fait l'objet d'études archéologiques et architecturales ont démontré le cas spécifique de ces thermes, tant au niveau des techniques mises en œuvre dans leur construction et leur fonctionnement que pour leur utilisation à des fins thérapeutiques. Il est évident que l'exploitation d'une source chaude pour l'alimentation d'un édifice thermal paraît faciliter la gestion de l'eau, puisqu'il n'est pas nécessaire de chauffer celle-ci pour satisfaire au besoin des pratiques du bain. Néanmoins, l'effet inverse se produit puisqu'il va falloir gérer cette eau naturellement chaude afin d'obtenir un degré de température adéquate aux bains. Ainsi, Sénèque propose pour pouvoir utiliser ces eaux chaudes, « de les laissées s'évaporer à l'air libre ou en les tempérant par un mélange d'eau froide » (*Questions Naturelles*, III, 24).

Il en advient une complexité dans le phasage architectural et le fonctionnement hydraulique des ces thermes spécifiques, et les interprétations ont souvent fait l'objet de controverses entre les spécialistes. C'est le cas, par exemple, des thermes de Hammat Gader, dans la vallée du Yarmuk (Israël), installés sur une source chaude et qui présentent un réseau complexe d'alimentation en eau chaude et froide. Dans la monographie qui leur est consacrée, Hirschfeld (1997) propose deux phases constructives identifiées dans l'édifice. Ceci est remis en cause par Broise (2003) qui, à la lecture des documents mis à disposition, identifie trois phases chronologiques et redonne sa cohérence à l'évolution de cet édifice, tout en réinterprétant le réseau hydraulique de l'édifice.

De nombreuses interrogations subsistent encore concernant le potentiel thérapeutique de ces eaux thermales et de leur exploitation en tant que sources curatives. Les plus célèbres de l'Antiquité sont peut-être celles sulfureuses de Baïes, en Campanie (Italie), « lieu de plaisance de tous les vices » selon Sénèque (*Lettres à Lucilius*, lettre 51), devenu « le rendez-vous des voluptueux aussi bien que des malades » dit Strabon (*Géographie*, Livre 5,9) et où l'empereur Hadrien est venu pour soulager ses douleurs et y terminer ses jours. Les problématiques liées aux thermes curatifs, ou exploitant des eaux curatives, constituent un des points centraux des récentes études menées par une équipe de recherche espagnole, dont les premières concernent directement le site thermal de Fortuna (région de Murcia, Espagne) (Séiquer *et al.*, 2003 ; Egea *et al.*, 2003 ; Fernández *et al.*, 1996) et, de manière plus générale, la survivance des édifices thermaux après la chute de l'Empire romain (Séiquer, 2006).

Les pratiques balnéaires occupent une place importante dans la civilisation romaine, représentant simultanément une « activité culturelle » et un « aspect social » dans le quotidien du citoyen romain. Cette particularité explique que les édifices thermaux, par leur nombre et leur taille souvent considérables, font partie intégrante du paysage architectural romain. Leur existence est souvent associée à une gestion complexe de l'eau, que ce soit pour leur approvisionnement lié à leur besoin conséquent en cette ressource, que pour leur fonctionnement spécifique, avec la présence simultanée de salles froides, tièdes et chaudes, qui engendre une certaine multiplicité de structures hydrauliques. Au sein des problématiques de recherche menées sur la complexité architecturale et fonctionnelle des thermes antiques, la prise en compte des dépôts sédimentaires susceptibles d'y être préservés, comme c'est le cas des travertins à Jebel Oust, se doit d'apporter son lot d'informations.

A.III. LE CAS SPÉCIFIQUE DES *TRAVERTINS S.L. ANTHROPIQUES*.

A.III.1 Pourquoi une nouvelle définition ?

A.III.1.1. Du naturel à l'anthropique.

A la suite de la définition des travertins *s.l.* que nous pouvons qualifier de « naturels », il paraît nécessaire, voire indispensable, d'introduire ici la notion de ***travertins s.l. anthropiques***. Nous avons perçu la diversité, tant au niveau de la morphologie et de la géométrie qu'au niveau de la sédimentologie de faciès et de la signature géochimique, des travertins *s.l.* qui se développent dans un géosystème non-anthropisé. Les recherches sur les travertins *s.l.* ont pu montrer que cette diversité est essentiellement due à des facteurs de contrôle naturels qui sont le climat et la tectonique régionale. Or, plusieurs études pluridisciplinaires ont pu démontrer l'impact humain sur le climat depuis 10 000 ans. Le facteur naturel climatique, qui va interagir avec les formations de précipitations carbonatées, contient ainsi dans son essence l'empreinte des activités humaines.

De plus, nous avons pu également voir l'impact que peuvent avoir certaines actions humaines sur le développement même de ces travertins *s.l.*, par le biais de facteurs directs (p. ex. l'exploitation en carrière, mise en place de contrainte hydrologique) ou indirects (p. ex. la déforestation, l'acidification des sols). Le facteur humain, et tout ce qu'il représente en terme d'activités et d'influence, va être susceptible de devenir le facteur de contrôle prépondérant de la précipitation carbonatée continentale. Ce constat rejoint les études antérieures ayant mené à considérer **l'homme comme un véritable agent géologique** (Ehlen *et al.*, 2005).

A.III.1.2. Le rôle de l'homme dans la dynamique sédimentaire.

La relation entre l'Homme et l'eau depuis l'aube des temps est clairement établie, depuis ses formes les plus simplistes à des gestions complexifiées (cf. A.II), et les civilisations humaines n'ont guère le moyen de se développer en absence de cette ressource. De plus, nous connaissons maintenant l'impact considérable qu'ont les activités humaines sur la dynamique sédimentaire. Des calculs de bilans sédimentaires et de changement tant dans la nature des matériaux transportés que dans leur rythme de transfert ont souligné le rôle prépondérant du **contrôle anthropique sur la sédimentation à la surface des continents** (p. ex. Campy et Macaire, 2003). En effet, depuis 5000 ans, l'homme peut être considéré comme un véritable facteur géologique direct à l'échelle planétaire (Ehlen *et al.*, 2005 ; Wilkinson, 2005). Ainsi, il a été prouvé que l'homme, par l'intermédiaire de l'industrie minière et de l'exploitation des carrières, déplace actuellement à l'échelle mondiale 1,7 fois plus de ce que déplacent toutes les rivières du monde (Young, 1992). Ces bilans globaux démontrent parfaitement **le rôle de l'homme comme agent géologique**, cependant les études concernant les périodes plus anciennes demeurent très rares. Une récente étude a prouvé que l'impact de l'homme en tant qu'agent de transport était bien supérieur à tous les autres agents de transport réunis, et ce depuis plus d'un millénaire (Hooke, 2000). Pour aborder cette question de l'homme comme agent géologique, Petit (2006) distingue deux types de sédiments anthropiques :

- les **sédiments anthropiques primaires**, témoins directs d'une activité humaine et situés dans ou à proximité immédiate de l'occupation humaine ;
- les **sédiments anthropiques secondaires**, dont la mise en place n'est pas directement liée aux activités humaines mais peut être contrôlée par le(s) facteur(s) anthropique(s) (p. ex. des colluvions, des alluvions, des sédiments lacustres).

En conséquence de l'énumération des influences humaines exercées sur la formation et sur les dépôts des travertins *s.l.* (cf. A.I.4) et de la prise en considération du rôle d'agent géologique de l'homme, le concept de **travertins *s.l.* anthropiques** prend alors tout son sens.

A.III.1.3. Ma définition des **travertins *s.l.* anthropiques**.

Le terme « travertin d'origine anthropique » fut utilisé pour la première et unique fois à ce jour par Fabre (1986) dans sa typologie des travertins du Sud-Est de la France, pour caractériser des dépôts carbonatés « autant originaux qu'esthétiques » (*sic*) présents dans certaines constructions humaines. En les qualifiant de peu épais et limités spatialement, l'auteur cite les exemples d'un dépôt en forme de champignon sur jet d'eau (Jardin de la Gare, Montpellier), en cascade sur un barrage situé à Collias (Gard), et les dépôts internes et externes d'un aqueduc romain (l'aqueduc de Nîmes). Par la suite, le même terme est repris et accolé à un type de travertins « artificiels » (Pentecost, 2005, p. 49). Pour les études en contexte archéologique, le terme « carbonates archéologiques » est généralement, et à bon escient, employé (Carlut *et al.*, 2009), mais ne possède pas de signification génétique.

Si l'utilisation du terme « d'origine anthropique » est totalement justifiée pour ces types de dépôts, puisque le dépôt même se forme dans une construction humaine, il reste cependant un large manque d'études pour l'adoption de cette nouvelle notion.

Ainsi, nous entendons par *travertins s.l. anthropiques* les travertins *s.l.* dont les activités humaines sont susceptibles d'exercer une influence sur la géométrie, la morphologie et le volume des sédiments précipités, ainsi que sur leur faciès sédimentaire et leur signature géochimique.

Les *travertins s.l. anthropiques* appartiendraient à la catégorie des « sédiments anthropiques secondaires », telle qu'elle est définie par Petit (2006). Leur mise en place n'est pas directement liée à des activités humaines, et donc ces sédiments ne peuvent pas précisément être considérés comme des sédiments anthropiques primaires. Cependant, leur dépôt et leurs caractéristiques géomorphologiques et géologiques vont être très largement contrôlés par l'Homme.

Les travertins *s.l.* étant des roches précipitées, et non détritiques, l'impact humain sur ces matériaux ne va pas se mesurer de la même façon. Une quantification exhaustive, prenant en compte les phases d'utilisation (c.-à-d. de formation de ces *travertins anthropiques*) et les phases de curage (c.-à-d. d'oblitération des dépôts antérieurs), des dépôts de travertin développés dans les structures archéologiques serait envisageable. Un autre volet pourrait concerner la quantification du volume de matériaux mis en jeu, à la fois à l'échelle du site d'extraction, et à l'échelle des bâtiments et des agglomérations, par exemple, pour le travertin de Tivoli. Cette quantification permettrait d'évaluer les compatibilités entre volume des sites d'extraction et volumes mis en œuvre afin de mieux cerner les contraintes géographiques, économiques et de transport de ce matériau.

A.III.2. Illustration de la diversité des *travertins s.l. anthropiques* : un premier inventaire.

La littérature scientifique propose plusieurs travaux dont la problématique est directement ou indirectement liée à l'étude des travertins *s.l.* préservés dans des sites ou structures archéologiques, et qui ont subi une certaine influence humaine. Par soucis de cohérence scientifique et pour éviter un inventaire « à la Prévert », nous présenterons ces différents *travertins s.l. anthropiques* en fonction de leur position géographique par rapport à la source responsable de leur formation, tout en séparant travertins et tufs calcaires. Ainsi, les travertins *s.l.* déposés aux environs de la source même (dépôts *in situ*, c.-à-d. proximaux) sont exposés en premier lieu, et viendront ensuite les dépôts anthropiques en position « distale ». Nous verrons ainsi que ces dépôts reflètent souvent les activités humaines entreprises lors du fonctionnement même de la structure hydraulique concernée (gestion différente, réfection, restauration, abandon), ou représentent des archives sédimentaires des fluctuations climatiques et hydrologiques naturelles au cours des périodes concernées.

A.III.2.1. Les travertins *s.l.* de sites d'extraction.

A.III.2.1.1. Les tufs calcaires : l'exemple du site de Rolampont (Haute-Marne, France).

Nous citerons comme exemple d'une exploitation directe d'un tuf calcaire la « tuffière » de Rolampont (Haute-Marne, France). Cette construction sédimentaire entièrement naturelle engendrée par une source pétrifiante calcaire est encore active de nos jours et présente une morphologie générale en cascade (dépôts proximaux du modèle de résurgence). L'observation de fronts de taille, dont la datation nous est inconnue mais certains sont probablement anciennes (c.-à-d. antiques), au sein de cette structure témoigne de l'utilisation de ce tuf calcaire par l'Homme. En exploitant ce matériau, ce dernier a créé une nouvelle morphologie à ce dépôt naturel (Fig. A.50). Ainsi, les dépôts postérieurs à ces exploitations se mettent en place sur une surface entièrement façonnée par l'Homme. La morphologie et la géométrie, ainsi que probablement le faciès et la signature géochimique, des dépôts calcaires de la tuffière de Rolampont vont être fortement contraintes par l'exploitation en carrière.



Figure A.50. Influence d'un front de taille dans la tuffière de Rolampont (Haute-Marne) sur le développement du tuf calcaire actif.

A.III.2.1.2. Les travertins : les exemples dans le bassin méditerranéen (Italie et Tunisie).

Nous avons vu l'importante exploitation des travertins depuis l'époque antique jusqu'à nos jours (cf. A.1.4.1). Nous connaissons quelques grandes carrières antiques exploitant ce matériau et qui ont perduré jusqu'aux époques modernes. Les grandes carrières de *Bagni di Tivoli*, qui ont donné son nom à la roche, sont exploitées dès l'Antiquité pour la construction de Rome. Les occupations humaines installées à proximité (immédiate ou non) de formations travertineuses ont largement exploité ce matériau, comme c'est le cas à Hammam Biadha et à Hammam Mellègue, en Tunisie, dont les fronts de taille sont nettement visibles dans le paysage géologique. Il est évident que ces exploitations en carrière ont fortement changé la morphologie du travertin originel et le volume de sédiments mis en place. A une échelle plus réduite, la récupération du travertin déposé par la source chaude de *Bullicame* (Italie) a généré une morphologie différente à ces dépôts naturels anciens (Fig. 51).

Si très peu de données quantitatives de volume extrait nous sont connues, cette nouvelle morphologie générale est susceptible de générer à nouveau une morphologie différente aux dépôts postérieurs à l'exploitation. Localement, le résultat est l'acquisition d'une véritable mosaïque chronologique dans la géométrie du dépôt, contrôlée quasi-exclusivement par la chronologie de l'exploitation.



Figure A.51. Un front de taille dans le travertin de Bullicame (Latium, Italie), témoignant de son extraction volontaire.

A.III.2.2. Les tufs calcaires de canaux agricoles : les « tecoatl » pré-aztèques (Mexique).

Mille ans avant notre ère, dans la vallée de Tehuacán, vers Puebla (Mexique), les ancêtres des Aztèques ont mis en place d'immenses réseaux d'irrigation, les plus vastes du continent américain à cette époque, afin de répondre aux fluctuations saisonnières des précipitations (Caran *et al.*, 1996). Dans un climat semi-aride, la construction de ces canaux, simple sillon creusé dans le sol et flanqués de petites digues, permettait d'assumer les cultures lors des périodes sèches de l'année. Au cours de leur fonctionnement, les canaux ont été progressivement remplis par des dépôts carbonatés pouvant atteindre jusqu'à cinq mètres d'épaisseur et ont ainsi été véritablement fossilisés dans le paysage (Fig. A.52, Caran *et al.*, 1996). Le nom local *tecoatl* (= « serpent de pierre ») utilisé pour désigner ces structures illustre parfaitement leur morphologie dans le paysage. L'étude stratigraphique des strates carbonatées composant ce remplissage a permis de mettre en évidence des saignées d'entretien des canaux (Neely, 2002 ; Caran et Neely, 2006), qui furent à nouveau recouvertes par des dépôts postérieurs. La présence de microorganismes végétaux dans ces tufs calcaires a été attestée (Winsborough *et al.*, 1996) et la datation au radiocarbone a montré que certains des canaux remontent à 800 BC et que plusieurs d'entre eux ont été entretenus jusqu'au début du XVI^e siècle. Dans leurs publications, les auteurs (Winsborough *et al.*, 1996) utilisent principalement le terme travertine pour définir les dépôts dans ces canaux, mais les données géochimiques qu'ils présentent (en particulier les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ mesurées sur les carbonates) nous laissent à penser qu'il s'agirait plutôt de tufs calcaires (cf. A.I.2.2).

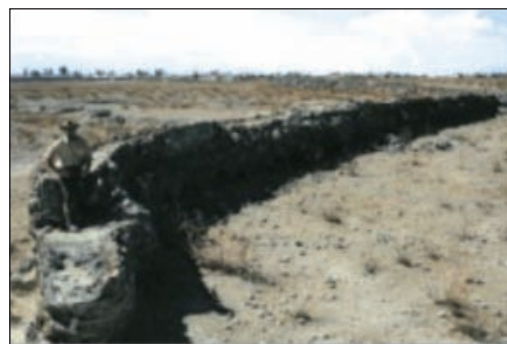


Figure A.52.
Un « tecoatl » dans le paysage de Puebla,
Mexique (Neely, 2002).

A.III.2.3. Les travertins *s.l.* d'aqueducs antiques.

A.III.2.3.1. Les tufs calcaires des aqueducs, châteaux d'eau et fontaines antiques.

Nous présenterons ici quelques cas particuliers de structures hydrauliques, exclusivement antiques, pour lesquelles la présence de dépôts de travertins *s.l.* est documentée. Nous débiterons cette série d'exemples de *tufs calcaires anthropiques* par un aqueduc privé alimentant une villa, puis nous présenterons les cas des aqueducs publics alimentant une ville, ainsi que l'exemple d'un château d'eau et d'une fontaine.

- Un aqueduc privé alimentant la villa gallo-romaine du Nouret (Val d'Oise, France) :

Une étude menée par Petit et Verrecchia (1998, fouilles AFAN, rapport non publié) sur les concrétions de l'aqueduc du site du Nouret (Val d'Oise) présente un grand intérêt quant au potentiel scientifique (géoarchéologique) archivé dans ces dépôts carbonatés. Grâce à une observation microscopique des encroûtements qui enduisent les parois de l'aqueduc et des analyses au microscope électronique à balayage, il a été possible de mettre en évidence des périodes d'assèchement dans l'histoire de cette canalisation (qui pourraient correspondre à des sécheresses décennales). La présence de microorganismes dans les dépôts et l'observation d'une réimperméabilisation par un enduit à la chaux prouverait que l'aqueduc a fait l'objet d'une ouverture au moins une fois après son utilisation et avant l'arrêt total de son fonctionnement et de son comblement.

- Une étude pionnière, l'aqueduc gallo-romain de Nîmes :

Parmi les travaux les plus anciens et les plus importants concernant les tufs calcaires d'aqueduc public, figurent ceux réalisés sur l'aqueduc de Nîmes ; ces travaux pluridisciplinaires, jouissant de la célébrité du site du Pont du Gard, ont été publiés dans la monographie consacrée à cet ouvrage d'art, rééditée en 2000, ainsi que plusieurs autres publications. Les dépôts carbonatés déposés par l'eau à l'intérieur du canal sont d'une telle importance, caractérisés par un volume global estimé à 35 000 m³ et un tonnage global estimé à 80 000 tonnes (Fabre *et al.*, 2000), que les études sur l'architecture, le fonctionnement et l'histoire de l'édifice ne pouvaient se faire sans prendre en compte l'étude de ces concrétions. Les analyses au microscope de ces encroûtements ont permis de déterminer leur origine biochimique (Adolphe, 1973) par activité edificatrice d'algues de type cyanophycées, alors que jusque là, seule la théorie physico-chimique était retenue (Joseph *et al.*, 2000). L'observation de structures algaires en lame mince ont confirmé ce résultat (Guendon et Vaudour, 1986). Dans le Pont du Gard, l'algue engendrant ces dépôts est une cyanophycée nommée *Schizothrix* (Adolphe, 1981). Si la présence de cette algue dans les conduites plus ou moins obscures de l'aqueduc peut étonner, Adolphe (1981) émet l'idée qu'elle se comportait différemment selon le trajet de la conduite : elle effectuait la photosynthèse dans les portions aériennes (où la lumière devait filtrer par des regards) mais se comportait en organisme saprophyte dans les parties souterraines. Une étude typologique et morphostratigraphique a été effectuée (Guendon et Vaudour, 2000), en distinguant en premier lieu les concrétionnements externes à l'aqueduc et les concrétion-

nements internes. Si l'épaisseur des concrétions internes est très variable le long du tracé de l'aqueduc (elles sont généralement moins épaisses dans la partie amont et dans les zones à forte pente), leur lithostratigraphie reste cependant uniforme. Deux types de faciès sont décrits : l'un est laminé, clair et dur, avec des structures algaïres témoins des processus d'édification biochimique tandis que le second est plus coloré et tendre, caractéristique de dépôts terrigènes. Le changement de faciès dans les concrétions internes est interprété comme une variation du régime et de la nature des eaux circulant dans la conduite. Une première phase caractérisée par une eau peu turbide engendre des concrétions claires et dures. Une seconde phase, engendrée par un changement de la qualité des eaux, responsable du changement de faciès, est matérialisée par des concrétions plus riches en éléments détritiques. Cette modification de la nature de l'eau correspond à une phase de dégradation de l'aqueduc puisque des fragments de la maçonnerie antique se retrouvent piégés dans les concrétions. Outre ces renseignements sur la nature des eaux et sur la dégradation de l'ouvrage, les auteurs se servent des encroûtements internes pour reconstituer les modifications et l'évolution des débits de l'aqueduc.

Concernant les concrétions externes, quatre types principaux ont été observés : des revêtements recouvrant les parois externes dans les tronçons aériens¹, d'importants amas dissymétriques plaqués sur l'une ou l'autre des parois (Fig. A.53), des spéléothèmes (stalagmites, petits stalactites et planchers stalagmitiques), et des accumulations de concrétions, localisées au pied d'édifices, de faciès blanchâtre et crayeux ou avec des fragments de manchons calcitiques, renfermant des gastéropodes d'eau douce. Les dépôts externes peuvent être les témoins de fuites, précoces ou tardives, de l'ouvrage, ou de dérivation de l'eau par des orifices percés dans les parois, lors d'une exploitation clandestine de l'eau circulant dans l'aqueduc. A travers une analyse microscopique de séquences carbonatées laminées préservées sur les parois internes, des auteurs s'appuient sur le nombre et la succession des lamines, assimilables à des varves lacustres, pour montrer des discontinuités liées soit à des interruptions (Adolphe, 1973) correspondant à certaines périodes historiques (grandes invasions, siège de Nîmes), soit à des fluctuations de l'activité solaire (Gilly, 1970, *in* Blanc, 2000) régissant la photosynthèse des organismes. Le comptage des lamines permet d'obtenir une approximation de la durée de fonctionnement de l'édifice (Adolphe, 1973 ; Blanc, 2000). L'analyse de ces lamines a également permis la mise en évidence de deux cycles de périodes de 11 ans et 80 à 90 ans qui pourraient correspondre à des microcycles climatiques, en liaison avec l'activité solaire (Fabre *et al.*, 1986).



Figure A.53.
Concrétion externe de débordement de l'aqueduc gallo-romain de Nîmes (Guendon et Vaudour, 2000).

¹ Leur absence au Pont du Gard s'explique probablement par les opérations successives de restauration de l'ouvrage d'art.

- L'aqueduc gallo-romain de Fréjus (Var, France) :

Les tufs calcaires déposés et préservés dans l'aqueduc (Fig. A.54a) alimentant la ville gallo-romaine de Fréjus ont été documentés par Dubar (2006a, 2006b). L'auteur dénombre un total de 102 lamines carbonatées composant ce dépôt, qu'il interprète comme des variations saisonnières dans la précipitation du carbonate liées à des variations hydrologiques des sources exploitées pour l'alimentation en eau de l'aqueduc. A travers une analyse spectrale appliquée sur la série chronologique de l'épaisseur des lamines, l'auteur a pu mettre en évidence une cyclicité dans la précipitation du carbonate, qu'il met en liaison avec un phénomène climatique, l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO). Des travaux plus récents sur les dépôts du même aqueduc (Bobée *et al.*, 2010), employant la méthodologie PIXE¹ permettant une analyse à très haute résolution de la composition élémentaire du sédiment, ont pu mettre en évidence, sur un enregistrement chronologique de 117 ans composé d'une succession de lamines alternativement sombres et claires, des variations cycliques des teneurs en strontium (Sr) et en fer (Fe).

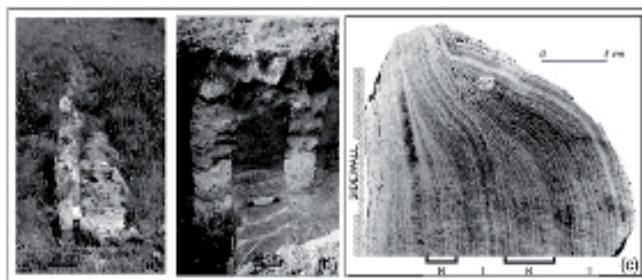


Figure A.54a. Les dépôts carbonatés de l'aqueduc de Fréjus (Bobée *et al.*, 2010) ; gauche : affleurement au Vallon de la Route, centre : vue du chenal à Callian, droite : échantillon provenant des Adrets.

- L'aqueduc romain de Cologne (Allemagne) :

Des travaux identiques ont été effectués sur les concrétions carbonatées laminées de l'aqueduc romain de Cologne (Schultz, 1986). Des analyses pétrographiques ont démontré la nature stromatolithique des concrétions calcaires ainsi que la présence d'algues vertes dans ces dépôts, dont il n'est pas certain qu'elles participent activement à la précipitation carbonatée. D'autre part, par une analyse spectrale des lamines carbonatées, qui sont d'une épaisseur moyenne de 2 mm, l'auteur met en évidence des cycles annuels et des cycles d'une période de 10-11 ans dans la précipitation carbonatée, qu'il met en liaison probable avec un facteur climatique.

- L'aqueduc de Fleury alimentant la ville gallo-romaine de Poitiers (Vienne, France) :

Les fouilles préventives menées par le bureau d'études Evéha (responsable scientifique du programme : E. Philippe ; géomorphologue : J. Brenot) sur l'un des aqueducs de l'antique Poitiers a pu mettre au jour un tronçon de l'aqueduc rempli par des dépôts calcaires. Ces dépôts ont une forme typique des dépôts d'aqueduc (Fig. A.54b) et présentent une séquence complexe dont des premières analyses microscopiques ont montré l'existence de plusieurs épisodes de précipitation du carbonate.

¹PIXE = Particle-Induced X-ray Emission.



Figure A.54b.
Dépôts carbonatés dans l'aqueduc gallo-romain de Poitiers
(Photo : J. Brenot, Evéha, fouilles 2013).

- L'aqueduc grec du Galermi alimentant la ville de Syracuse (Sicile) :

Les recherches pluridisciplinaires récentes menées sur l'aqueduc grec du Galermi alimentant l'antique Syracuse (Programme *HydroSyra* coordonné par S. Bouffier, Université Aix-Marseille) ont pu mettre au jour un tronçon de l'aqueduc grec, creusé dans le rocher, et colmaté par des dépôts carbonatés de type tufs calcaires. D'une vingtaine de centimètres d'épaisseur, ces dépôts présentent la forme typique de dépôts d'aqueduc, recouvrant le fond et les parois du canal (Fig. A.55), et présentent plusieurs faciès témoignant de changements de la précipitation dus à des variations dans l'alimentation en eau de l'aqueduc (inédit, 2012). Ces épisodes peuvent traduire des variations hydrologiques de la source ou des périodes d'utilisation différentes de l'aqueduc (dysfonctionnement ? réfection ?).



Figure A.55.
Dépôts carbonatés dans l'aqueduc grec de Syracuse.

- L'aqueduc des thermes romains de Caracalla à Rome (Italie) :

Conçus par l'empereur Septime Sévère, les thermes de Caracalla furent inaugurés en 216 apr. J.-C., sous le règne de son fils, *Marcus Aurelius Antoninus Bassianus*, surnommé Caracalla. Merveilleusement conservés, les vestiges de cet édifice témoignent de sa grandeur exceptionnelle, parmi les plus grands thermes de Rome, seulement dépassées en taille par les thermes de Dioclétien, qui leur sont postérieurs de presque un siècle. Parallèlement à l'analyse de la complexité architecturale du bâtiment, l'étude de l'alimentation en eau de ces thermes majestueux relève d'une importance considérable si l'on veut comprendre le(s) fonctionnement(s) hydraulique(s) mis en œuvre. D'énormes citernes recevaient les eaux de l'aqueduc *Aqua Antoniniana*, branche

secondaire de l'*Aqua Marcia*, l'un des grands aqueducs alimentant en eau la ville de Rome. Deux études ont été effectuées sur les dépôts carbonatés préservés dans cet aqueduc, l'une concernant la portion de l'aqueduc vers l'Arc de Drusus (*Arco di Druso*) (Garbrecht et Manderscheid, 1992) et la seconde sur les dépôts carbonatés préservés au débouché de l'aqueduc dans l'édifice thermal (Hostetter, 2007). Garbrecht et Manderscheid (1992) ont pu montrer, grâce à une analyse précise de la stratigraphie des lamines de calcite composant ce tuf calcaire, deux phases chronologiques dans le fonctionnement de l'aqueduc. Les seconds travaux¹ proposent une datation, au radiocarbone, médiévale des dépôts de l'aqueduc à son arrivée aux citernes jouxtant les thermes (Fig. A.56).



Figure A.56.
Amas de dépôts carbonatés au débouché d'une canalisation alimentant des citernes jouxtant les thermes de Caracalla (Rome, Italie).

- Le château d'eau (*castellum divisorium*) antique d'Ostie (Italie) :

Dans le cadre du projet pluridisciplinaire coordonné par H. Dessales², intitulé « La mémoire de l'eau : approches interdisciplinaires sur l'alimentation hydraulique de Pompéi » et dont la problématique majeure porte sur l'alimentation en eau des villes romaines, les dépôts carbonatés, de type tufs calcaires, préservés sur les parois du *castellum* antique de la ville d'Ostie ont pu être documentés. Les premiers résultats ont pu mettre en évidence la présence de lamines, alternativement claires et sombres, dans la structure microscopique de ces dépôts. Couplée à une analyse géochimique du contenu en éléments traces de ces tufs calcaires (Carlut *et al.*, 2009), l'étude de cette succession de lamines met en lumière des changements dans le flux et la nature de l'eau alimentant le château d'eau, et donc la ville.

- Une fontaine antique à Cimiez / *Cemenelum* (Alpes-Maritimes, France) :

Identifiés comme la conséquence de fuites de canalisations modernes par Benoit (1977) dans la monographie consacrée à la ville antique de Cimiez (l'antique *Cemenelum*, à Nice), les dépôts carbonatés présents dans un

¹ Ces travaux furent présentés lors du colloque consacré aux thermes de Caracalla, organisé à Rome en février 2007 et dont les actes sont en cours de publication.

² Maître de conférences en archéologie à l'Ecole Normale Supérieure (Paris), rattachée à l'UMR 8546-AOROC ; le projet pluridisciplinaire est en collaboration avec le laboratoire de géologie de l'ENS (UMR 8538) et l'Ecole Française de Rome.

structure archéologique située à proximité immédiate d'un édifice thermal ont permis, à la suite de nouvelles opérations archéologiques, d'identifier à cet endroit une fontaine gallo-romaine (Grandieux, 2005). L'épais dépôt de calcite observé sur un bloc de construction quadrangulaire a moulé une structure de forme rectangulaire, aujourd'hui disparue, et dont le négatif se poursuit sur le mur mitoyen. Ce dispositif, dont il ne subsiste que le fantôme, correspondrait à une colonne munie d'une base moulurée posée sur le bloc quadrangulaire et aux éléments de décor de la fontaine (pilastre en placage de marbre). D'après les observations de l'auteur, le dépôt calcaire est venu également recouvrir ce qui correspondrait à la bouche d'eau de la fontaine, ou à un dispositif de trop-plein d'un bassin aujourd'hui disparu, ainsi que le sol dallé de la fontaine.

A.III.2.3.2. Les travertins d'aqueducs.

A l'heure actuelle de nos recherches, nous connaissons quelques rares exemples d'aqueducs encroûtés par des travertins. Celui de Jebel Oust, qui alimente en eau chaude l'édifice thermal romain, à partir d'une source chaude aujourd'hui tarie, est creusé directement dans le rocher naturel et est remblayé par plusieurs mètres de dépôts issus de la source antique. Nous détaillerons plus loin (cf. B.III.1) la morphologie et le faciès des travertins comblant cet aqueduc, et les résultats que nous avons pu déduire de cette étude.

Nous connaissons également le cas d'un petit aqueduc de la source chaude du site de *Piscina Carletis*, située à proximité de la célèbre source de *Bullicame*, au sein de la ville de Viterbe (Latium, Italie). Cet aqueduc, large d'environ un mètre et long d'une centaine de mètres, alimente une série de bassins à ciel ouvert et est rempli d'une épaisse séquence de travertins qui déborde de chaque côté des parois maçonnées (Fig. A.57). Sur le site de *Bullicame* (Latium, Toscane), une série de petits aqueducs alimentent actuellement de grands bassins peu profonds. Issus de cette même source, d'importants dépôts de travertins semblent avoir moulé d'anciens canaux, dont l'âge nous demeure inconnu, mais qui semblent avoir fonctionné dans le but d'alimenter des bassins encore nettement visibles en aval.



Figure A.57.
Aqueduc comblé de travertin sur le site
de *Piscina Carletis* (Latium, Italie).

A.III.2.4. Les travertins *s.l.* de thermes antiques.

Après avoir illustré la notion de *travertins s.l. anthropiques* par des exemples de dépôt proximaux (cf. A.III.2.1) et intermédiaires (cf. A.III.2.2 et A.III.2.3), il s'agit maintenant de s'intéresser aux dépôts de *travertins s.l. anthropiques* situés plus en aval dans le trajet de l'eau, au niveau de structures dans lesquelles la gestion de l'eau montrera une complexité plus importante : les thermes antiques.

A.III.2.4.1. Les tufs calcaires préservés dans des thermes antiques : les exemples gallo-romains.

- Le complexe thermal de Vertault/*Vertillum* (Côte d'Or, France) :

Installé sur un plateau dominant la vallée de la Laignes, un affluent de la Seine, le site antique de Vertault/*Vertillum* comprend, parmi les bâtiments publics référencés dans la ville antique, un édifice thermal d'époque gallo-romaine (Bénard *et al.*, 2010). Lors du dernier état de fonctionnement des thermes, des remaniements semblent avoir touché certaines pièces, remaniements qui sont probablement dus à la présence de dépôts carbonatés sur les parois et les sols des salles thermales. De quelques centimètres d'épaisseur et d'un faciès finement laminé présentant une certaine zonation calcitique (Fig. A.58), ces tufs calcaires sont conservés essentiellement entre deux murs accolés et appartenant à la piscine chaude de l'édifice. Leur position stratigraphique témoigne de leur dépôt au cours d'une phase de fonctionnement antérieure à la dernière phase chronologique préservée. Si l'on ne connaît pas, à l'heure actuelle, le mode d'alimentation de ces thermes, la présence de ces dépôts plaide en faveur de l'utilisation d'une eau calcaire, provenant probablement d'une résurgence karstique de la région de Vertault, non identifiée à ce jour.

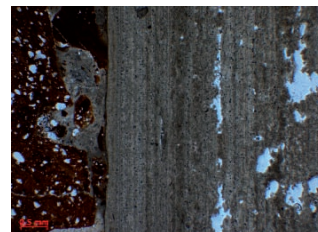


Figure A.58. Observation en lame mince des dépôts thermaux de Vertault (Côte d'Or) : lamines calcitiques (à droite) sur mortier de tuileau (à gauche).

- Les bains privés de la villa antique Jonvelle (Haute-Saône, France) :

Les vestiges d'un établissement balnéaire privé ont été mis au jour dans les années 1960 à Jonvelle, en Haute-Saône (Barcon et Bonvalot, 2001). Les bains d'une *villa rustica*¹, occupant une surface au sol de 90 m² et divisés en trois salles communiquant les unes avec les autres par des passages aménagés dans les murs, exploitaient l'eau d'une source dont le captage antique a été réutilisé de nos jours et qui présente un dépôt important de tufs calcaires. De plus, le fond et les parois de deux petites piscines sont recouverts par des dépôts carbonatés, qui laisseraient supposer, selon les fouilleurs, un chauffage très puissant. Une caractéristique particulière du site de Jonvelle est la prétendue existence d'une structure spécifique à la gestion de cette eau calcaire et qui permettrait de faire précipiter les carbonates en amont, avant que l'eau n'arrive aux thermes. Si la prétendue structure s'avère posséder cette fonction spécifique, elle constituerait un exemple encore unique d'une telle gestion d'une source carbonatée.

¹Les vestiges du bâtiment thermal sont ouverts au public et un musée est consacré aux résultats des fouilles menées par l'abbé E. Descourvières au cours de l'année 1968 : *Musée des vestiges gallo-romains*, rue Debauchée, F-70500 Jonvelle.

A.III.2.4.2. Les *travertins anthropiques* de thermes antiques : les exemples tunisiens.

L'exemple de thermes antiques qui illustre parfaitement cette notion de *travertins anthropiques* est l'édifice thermal romain du site de **Jebel Oust**, que nous détaillerons plus loin (cf. B.III).

En parallèle de cet exemple qui nous concerne directement ici, il existe, à notre connaissance, deux autres exemples de thermes en Tunisie qui conservent des travertins dans leurs structures : les thermes de **Hammam Biadha** et les thermes de **Hammam Mellègue**. Nous avons déjà vu que le cône de travertin naturel formé sur ces deux sites a été exploité et que ce matériau a été utilisé dans le gros œuvre des bâtiments antiques (cf. A.I.4.1.1 et A.III.2.1.2). L'exploitation de l'eau chaude pour l'alimentation des thermes de ces deux sites a engendré le dépôt de travertin de plusieurs centimètres d'épaisseur à l'intérieur des canalisations et dans les piscines. La géométrie et la morphologie des dépôts seront très similaires aux dépôts que nous observerons dans les thermes antiques de Jebel Oust.

Sur le site de Hammam Biadha, la fin du fonctionnement des thermes antiques, entraînant l'arrêt de l'alimentation en eau, a provoqué une modification de l'émergence de la source chaude. Canalisée auparavant, l'eau thermale coule à nouveau « naturellement », générant ainsi la formation d'un nouveau cône de travertin dans le paysage qui est venu fossiliser certaines structures antiques.

A.III.3. Synthèse sur la notion de *travertins s.l. anthropiques*.

Au regard du rôle considérable des activités humaines dans le contrôle des caractéristiques sédimentaires d'un nombre important de travertins *s.l.*, il semble nécessaire d'introduire, dans la définition des *travertins s.l.*, la notion d'« origine anthropique ». En effet, **le facteur de contrôle prépondérant dans le développement de ces structures sédimentaires est le facteur humain**. Cette influence humaine sur le développement intrinsèque du travertin peut être synthétisée en faisant intervenir plusieurs facteurs de contrôle, directs ou indirects, jouant un rôle, positif ou négatif, sur la précipitation carbonatée.

Les facteurs directs vont concerner l'exploitation du travertin en carrière, qui va modifier la morphologie et la géométrie des dépôts (cf. A.III.2.1) ainsi que l'installation de structures à fonction hydraulique contraignant la circulation de l'eau. Ces structures peuvent comprendre des ensembles pour lesquels la contrainte de l'eau sera relativement simple, comme les canaux et les aqueducs, et des édifices qui feront apparaître une gestion de l'eau plus complexe, les thermes.

Les facteurs anthropiques indirects sont ceux qui exercent une influence sur les dépôts de travertins *s.l.* sur un temps plus long. L'exploitation des ressources d'un milieu, traduit par une mise en culture du milieu et/ou une déforestation, va entraîner des modifications du dynamisme hydrologique du géosystème et des conditions physico-chimiques du dépôt de travertin *s.l.*. Ces facteurs indirects vont avoir un impact plutôt délétère sur la

croissance des dépôts, expliquant notamment le déclin de la production de tuf calcaire holocène.

En parallèle de ces facteurs anthropiques, des facteurs naturels contrôlant le développement des *travertins s.l. anthropiques* existent par l'intermédiaire des conditions et des variations climatiques, ainsi que des phénomènes de tectonique régionale (séisme).

La notion de *travertins s.l. anthropiques* prend ainsi en compte plusieurs facteurs de contrôle (Fig. A.59) : les facteurs naturels (climat et tectonique régionale) et les facteurs anthropiques, qu'ils soient directs (exploitation, construction de structures hydrauliques et gestion) ou indirects (déforestation, acidification des sols).

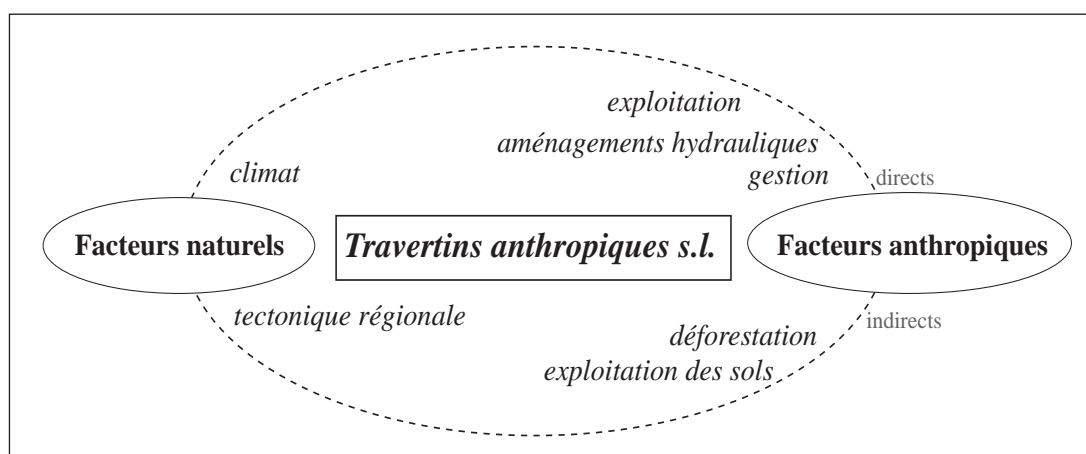


Figure A.59. Facteurs de contrôle (naturels et anthropiques) sur le développement des travertins s.l.

A.IV. PROTOCOLE D'ÉTUDE ET MÉTHODOLOGIE : DU TERRAIN AU LABORATOIRE...

Il est indispensable d'établir un protocole d'étude et une approche méthodologique propre aux *travertins s.l. anthropiques*, en nous appuyant sur l'exemple précis et cohérent des travertins préservés sur le site archéologique de Jebel Oust, pilier central de nos travaux de recherche. Cette méthodologie allie un certain nombre de techniques permettant d'analyser les travertins *s.l.* à différentes échelles (Fig. A.60), du terrain (détection visuelle) au laboratoire (détection instrumentale).

Deux grandes étapes sont nécessaires à l'analyse géoarchéologique de ces dépôts sédimentaires, consistant, en premier lieu, à un important travail de terrain, que nous détaillerons dans un premier paragraphe. Ce n'est qu'à la suite de ce travail de terrain que doivent débiter les analyses effectuées exclusivement en laboratoire, et dont nous développerons les principes et les protocoles utilisés dans un second paragraphe. Nous concluons ce chapitre par une brève synthèse du protocole général à mettre en œuvre pour l'étude de ces *travertins s.l. anthropiques*.

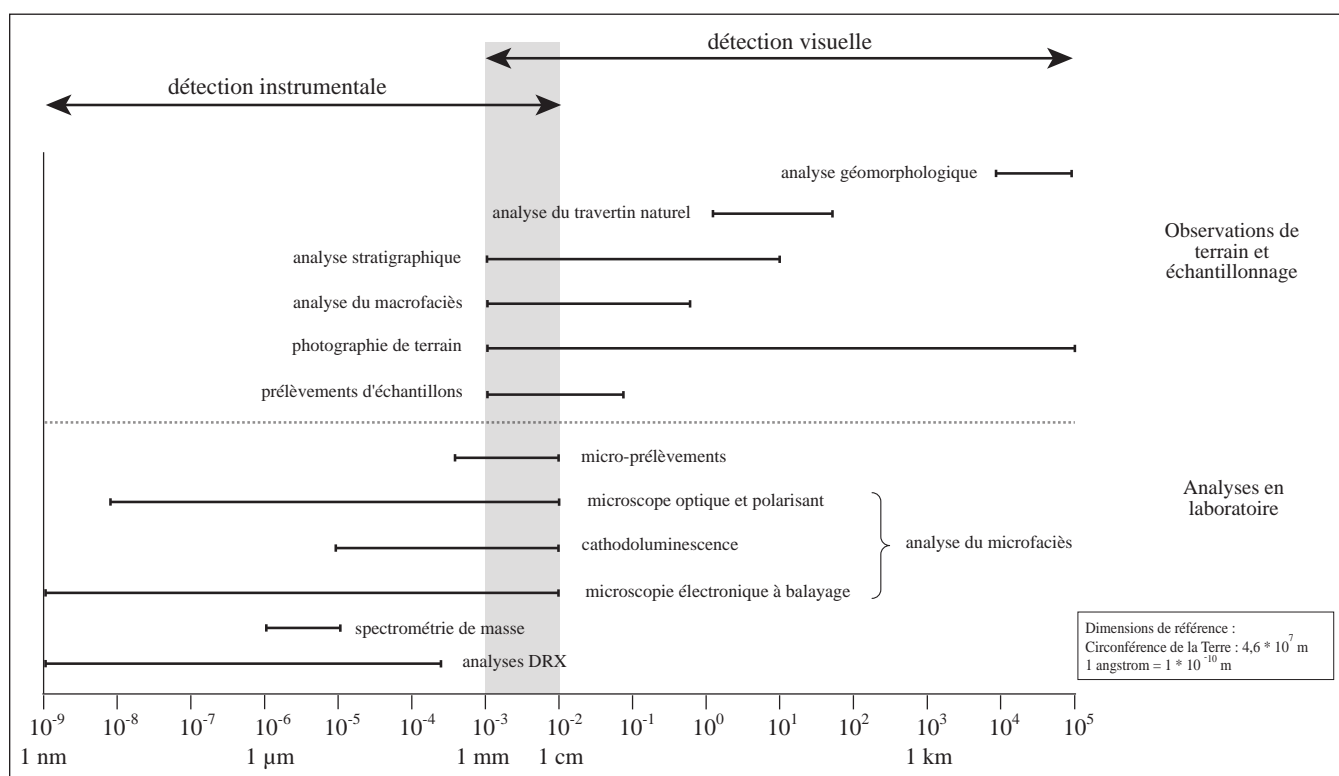


Figure A.60. Méthodologie multi-échelle appliquée à l'analyse des travertins *s.l. anthropiques*.

A.IV.1. Un travail sur le terrain.

- **Replacer/restituer le site archéologique dans son environnement.**

L'objectif principal de cette première approche est d'établir des premières données sur les relations entre l'Homme et son environnement, qui représenteront le point de départ de notre enquête géoarchéologique. Dans le cas de l'étude du site de Jebel Oust, il s'agit particulièrement de comprendre le système géothermal de la région d'étude et le fonctionnement hydrologique de la source chaude exploitée à l'époque antique. En étudiant les données existantes et archivées ainsi que les affleurements géologiques observés aux alentours de la source thermale et dans la région, il est possible d'établir un modèle hydrogéologique de cette source, modèle qui sera indispensable à l'étude de son exploitation par l'Homme. L'observation exhaustive des affleurements de travertins déposés par la source avant l'occupation humaine est nécessaire pour appréhender les conditions de l'installation du site antique. De plus, les caractéristiques géologiques (morphologie, géométrie des dépôts, sédimentologie de faciès et géochimie) de ces travertins pré-antiques pourront être comparées avec celles des travertins contemporains de l'occupation antique.

- **L'étude des *travertins anthropiques* : analyse pétrographique et stratigraphique.**

L'étude des travertins déposés pendant l'occupation humaine, lors de l'exploitation de la source chaude, constitue l'ossature de notre approche géoarchéologique. Les premières caractérisations de ces travertins devront concerner leur morphologie et leur géométrie, et une première analyse sédimentologique à l'échelle macroscopique sera réalisée afin de définir les différents faciès observés, à l'aide des outils classiques utilisés en géologie de terrain. En parallèle, une analyse fine et précise de la stratigraphie de ces dépôts est effectuée, en prenant en compte les différents arguments géologiques et archéologiques (architecturaux) de chronologie relative. Cette analyse stratigraphique permet d'enrichir notre enquête sur les relations entre les activités humaines, la source et les sédiments associés. Nous nous aidons sur le terrain d'un microscope USB *Veho Discovery VMS-004 Deluxe*® (Zoom *400), pour une première approche de l'analyse des microfaciès, qui sera complétée par la suite en laboratoire.

- **Une campagne de prélèvements.**

Les différentes missions sur le terrain doivent être l'occasion d'effectuer une campagne de prélèvements cohérente et exhaustive pour des analyses réalisables uniquement en laboratoire.

- **Le prélèvement des eaux de la région :**

Les différentes eaux naturelles de la région du site de Jebel Oust (eau de pluie, eaux douces et eaux thermales) ont été échantillonnées afin d'être analysées (température, pH, isotopes stables). Les mesures de température et de pH de chacune d'entre elles ont été effectuées à l'aide d'une sonde multiparamètres de terrain (Fig. A.61).



Figure A.61.
Sonde multiparamétrique de mesure de la
température et du pH des eaux.

Les eaux ont été prélevées dans des flacons en verre à sertir, d'une contenance de 100 mL, sans aucune pollution d'air dans le flacon. Chaque échantillon d'eau a été conditionné à l'abri de la lumière et à une température de 4-5°C, avant d'être analysé en laboratoire.

- Le prélèvement des carbonates du site de Jebel Oust :

Si le panel d'échantillons prélevés sur le site doit être le plus complet possible, il doit absolument et nécessairement être construit de manière logique et cohérente suivant les observations effectuées à l'échelle macroscopique et doit s'effectuer en étroite collaboration avec les différents spécialistes en charge de l'étude des structures archéologiques. Sur le site de Jebel Oust, les prélèvements de carbonates ont concerné l'ensemble des secteurs étudiés, depuis la zone cultuelle en amont jusqu'aux thermes situés en aval.

Nous utilisons pour les prélèvements de carbonates du site archéologique un carottier de terrain à moteur thermique *Stihl*TM, de puissance 28 cc, équipé d'un mandrin acceptant des forets tubulaires en diamant de diamètre 25 mm, avec adjonction automatique et/ou manuelle d'eau (Fig. A.62). Les carottes prélevées sont positionnées sur le plan du site, polarisées, répertoriées et photographiées, puis conditionnées dans un tube en PVC, assurant une excellente conservation des sédiments jusqu'à leur futur traitement en laboratoire.



Figure A.62.
Carottier à moteur thermique utilisé pour
le prélèvement des travertins.

A.IV.2. Une étude en laboratoire.

• L'analyse pétrographique et minéralogique.

Les analyses effectuées en laboratoire offrent en premier lieu la possibilité de documenter les différents faciès observés et étudiés à l'échelle microscopique. Les analyses pétrographiques et minéralogiques des différents faciès suivent un protocole rigoureux et permettront une définition et une détermination précises de chaque

microfaciès de travertin. Pour les échantillons de travertins provenant du site de Jebel Oust, les analyses pétrographiques et minéralogiques ont été effectuées au sein du laboratoire *Biogéosciences/UMR 6282*¹, à l'Université de Bourgogne.

Chaque carotte prélevée sur le site archéologique est conditionnée dans un tube en PVC adéquat à une préservation optimale du matériel sédimentaire puis est indurée grâce à une résine époxyde transparente, l'*araldite*TM, afin de figer le matériel au sein du tube. Chaque carotte est ensuite coupée en deux suivant l'axe de croissance du sédiment, à l'aide d'une scie circulaire en diamant.

Les échantillons représentatifs sont passés en lame mince d'une épaisseur moyenne de 30 µm, pour une observation au microscope optique de type *Leica*[®] *DM4000B* (grossissement x10 à x400) couplé à un appareil photo *Leica DFC300FX* et à un logiciel d'images *Leica IM1000*. Ces observations microscopiques sont complétées par des observations au Microscope Electronique à Balayage (MEB) de type *JEOL 6400* de capsules d'échantillon d'1 cm² chacune. Certaines lames minces d'échantillons significatifs sont polies à l'aide d'une poudre d'oxyde de cérium, pour un passage analytique par cathodoluminescence², afin de compléter et d'étayer les informations minéralogiques.

L'analyse minéralogique des échantillons a été effectuée par la méthode de Diffraction des Rayons X sur roche totale. Environ 300 mg de l'échantillon sont prélevés et broyés en poudre, puis analysés à l'aide d'un diffractomètre *Brucker*TM *D4 Endeavor* équipé d'un détecteur rapide *LinxEye*. Les pics de diffraction, référencés dans les diffractogrammes de résultat, sont identifiés à l'aide du logiciel *MacDiff*³ (v.4.2.5).

• Les analyses géochimiques.

- Analyse des isotopes stables des eaux de la région de Jebel Oust.

L'analyse des isotopes stables de l'hydrogène et de l'oxygène des eaux de la région de Jebel Oust, prélevées sur le terrain, ont été effectuées en collaboration avec Christophe Renac⁴, géochimiste au sein du département de Géologie de l'Université de Saint-Etienne. La ligne d'extraction des isotopes stables se déroule suivant les étapes suivantes :

- Introduction du matériel à l'aide d'une seringue (2 à 4 µL) ;

¹ UMR-CNRS/UB 6282, UFR Sciences de la Vie, de la Terre et de l'Environnement ; 6 boulevard Gabriel F-21000 Dijon ; site internet : <http://biogeosciences.u-bourgogne.fr/>.

² L'analyse par cathodoluminescence consiste à bombarder d'un faisceau d'électrons à très haute énergie la surface de l'échantillon qui va émettre alors une radiation lumineuse dépendante du réseau cristallin et/ou des impuretés présentes dans l'échantillon (phénomène de cathodoluminescence).

³ Le logiciel MacDiff est un logiciel libre, développé par R. Petschick, docteur de l'Institut de Géologie et de Paléontologie de l'Université de Francfort-Mayence, Allemagne. Ce logiciel, équipé d'une interface graphique fonctionnelle et qui fonctionne sur une plateforme Mac, permet l'affichage et l'analyse des résultats DRX.

⁴ UMR-CNRS 6524, Département de Géologie, Université Jean Monnet ; 23 rue du Dr. P. Michelon, F-42023 Saint-Etienne ; site internet : <http://www.univ-st-etienne.fr/geologie/research/umr6524.htm>.

- Réduction de l'eau « totale » sur zinc ou aluminium (métal), après élimination du CO₂, N₂, etc. ;
- Conservation dans des tubes de pyrex de l'eau et du zinc jusqu'à réduction et analyse ;
- Réduction de l'eau sur uranium chaud (le rendement de la réaction est contrôlé à l'aide d'une jauge de type capacitance) ;
- Stockage du gaz sur charbon actif ;
- Analyse sur spectromètre à source gazeuse.

Les compositions isotopiques sont données selon la notation traditionnelle δ exprimée en pour mille (‰), par rapport au standard SMOW. La reproductibilité est $\pm 0,2$ ‰ pour les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ et ± 2 ‰ pour le δD .

- Analyse des isotopes stables de l'oxygène et du carbone des carbonates.

L'analyse des isotopes stables de l'oxygène et du carbone des carbonates prélevés sur le site archéologique de Jebel Oust ont été effectuées au laboratoire *Leibniz-datation radiométrique et de recherche isotopique* de l'Université de Kiel (Allemagne), en collaboration avec Nils Andersen¹, directeur du service des isotopes stables de ce laboratoire. Les analyses des isotopes stables ont été réalisées à l'aide d'un spectromètre de masse *Finnigan® MAT 251 Dual Inlet* (Fig. A.63).

Les compositions isotopiques sont données selon la notation traditionnelle δ exprimée en pour mille (‰), par rapport au standard PDB. La reproductibilité est $\pm 0,1$ ‰ pour le $\delta^{13}\text{C}$ et le $\delta^{18}\text{O}$.

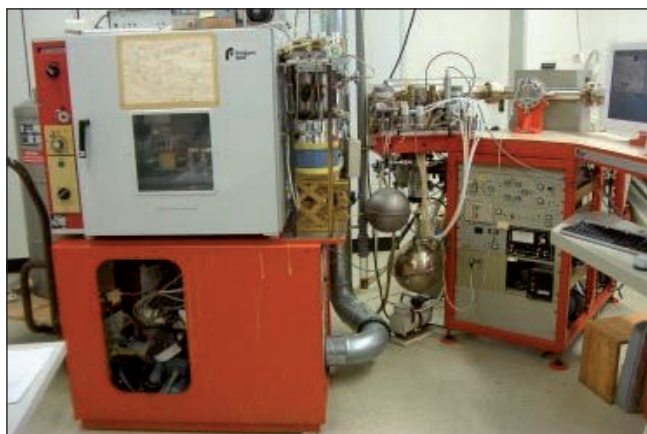


Figure A.63.
Spectromètre de masse du laboratoire *Leibniz-datation radiométrique et de recherche* à l'Université de Kiel (Allemagne).

• L'analyse d'images de séquences laminées.

L'analyse de séquences laminées de travertin doit être effectuée sur des échantillons correctement positionnés dans le contexte archéologique du site archéologique, polarisés et conditionnés pour une analyse d'image. L'acquisition d'image peut être effectuée sur le terrain ou en laboratoire à l'aide d'un appareil photo numé-

¹Leibniz-Laboratory for Radiometric Dating and Isotope Research ; Christian-Albrechts-Universität zu Kiel ; Max-Eyth-Str. 11-13, 24118 Kiel, Germany ; site internet : http://www.uni-kiel.de/leibniz/Leibniz-web_englisch/index-english.htm.

rique offrant une résolution minimum de 4 Méga pixels¹. Pour traiter et analyser l'image obtenue, nous utilisons le logiciel *Strati-Signal* v.1.0.5, développé au sein de la thèse de M. Ndiaye (Ndiaye, 2007), soutenue à la Faculté des Sciences de l'Université de Genève².

Le logiciel *Strati-Signal* est un logiciel d'analyse dédié au signal stratigraphique. Il s'appuie sur plusieurs modules qui sont : un module d'acquisition du signal, un module d'analyse des données, un module d'analyse de cyclicité et un module d'analyse et de corrélation stratigraphiques. Ce logiciel offre une méthode d'analyse semi-automatique de sédiments laminés, qui se déroule en plusieurs étapes successives :

- Acquisition du signal brut par un balayage numérique des pixels le long de la séquence sédimentaire ;
- Transformation du signal brut en signal filtré par différentes méthodes semi-automatisées ;
- Détermination automatique du nombre de lamines constituant la séquence.

• Les analyses palynologiques.

Les analyses du contenu sporo-pollinique des travertins de Jebel Oust ont été effectuées au laboratoire *Chrono-Environnement*/UMR 6249 à l'Université de Franche-Comté, sous la direction de Hervé Richard³. L'extraction et l'analyse des spores et des grains de pollen des sédiments carbonatés suivent un protocole scientifique précis défini par les spécialistes, qui comprend les étapes suivantes :

- Prélèvement d'un volume standard de sédiment ;
- Traitement chimique : le pollen est extrait de sa gangue minérale à l'aide de divers produits chimiques (acide chlorhydrique, soude, acide fluorhydrique, chlorure de zinc...) ;
- Mise en place sur une lame mince : dépôt d'une goutte du culot entre lame et lamelle ;
- Détermination et comptage des grains de pollen au microscope ;
- Saisie informatique des données issues de la précédente étape ;
- Interprétation du diagramme pollinique.

• Les analyses PIXE (*Particle Induced X-ray Emission*).

Les analyses PIXE ont été réalisées à l'aide du dispositif AGLAE (Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire – Calligaro *et al.*, 2004 ; Salomon *et al.*, 2008) dans les locaux du C2RMF (Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France), au Palais du Louvre, Paris. Les analyses ont été réalisées en tir continu sur les surfaces polies (afin d'éviter la déviation du faisceau sur une surface rugueuse) d'échantillons de travertins, le long de profils linéaires suivant la croissance du carbonate. Les émissions des rayons-X ont

¹Nous utilisons pour ce travail le *Panasonic® Lumix DMC-FX33* à capteur CDD de 8 millions de pixels.

²Département de Géologie et Paléontologie ; Université de Genève ; 13 rue des Maraîchers 1211 Genève ; site internet : www.unige.ch/sciences/terre/geologie/index.html.

³Directeur de recherche – CNRS, UMR 6249 Chrono-environnement, Université de Franche-Comté ; La Bouloie – UFR Sciences et Techniques, 16 route de Gray, F-25030 Besançon ; site internet : <http://chrono-environnement.univ-fcomte.fr/>

été mesurées à l'aide de deux détecteurs Si (Li) (Calligaro *et al.*, 2000). La distance entre deux points de mesure est de 192 μm ; les données brutes ont été enregistrées en « coups par seconde » convertis en unités de concentration (c.-à-d. ppm) grâce au logiciel GUPIX (Maxwell *et al.*, 1995).



Figure A.64.
Le dispositif AGLAE (Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire) ;
l'accélérateur électrostatique est le cylindre gris à l'arrière-plan.

Synthèse sur le protocole d'étude propre aux *travertins anthropiques*.

L'étude et l'analyse de *travertins anthropiques* doivent suivre un protocole rigoureux, propre à ces sédiments particuliers. Majoritairement situés en contexte archéologique, le point de départ de leur étude doit correspondre à l'appréhension de leur relation avec les techniques et les structures des sociétés humaines. Un travail sur le terrain, préalablement à un travail en laboratoire, sera indispensable pour restituer le site et les travertins qu'il comporte dans son contexte géologique, hydrologique et géographique. Ces campagnes de terrain doivent être l'occasion d'effectuer une première approche de l'analyse morphologique, stratigraphique et pétrographique des dépôts, indispensable pour réaliser un ensemble cohérent de prélèvements d'échantillons qui serviront au travail en laboratoire. Celui-ci devra se dérouler suivant plusieurs étapes, depuis les premiers examens qui permettront de contrôler la pétrographie et la minéralogie du sédiment, jusqu'aux analyses paléoécologiques éventuelles (palynologie, malacologie, etc.), chacune des méthodes et techniques employées devant obligatoirement suivre un protocole d'étude rigoureux et fixe.

**PARTIE B - ETUDE GÉOARCHÉOLOGIQUE
DES *TRAVERTINS ANTHROPIQUES* DU SITE DE
JEBEL OUST (TUNISIE).**

Cette partie est consacrée à l'étude des travertins anthropiques, notion définie auparavant, préservés dans les structures archéologiques antiques du site de Jebel Oust, en Tunisie. Après une présentation du site d'étude et de son environnement archéologique, hydrologique et naturel, les différents types de travertin observés sur le site sont décrits et définis, depuis le secteur du temple localisé au niveau de l'évent thermal de la source antique jusqu'aux thermes situés en contrebas. Les relations entre l'Homme et les sédiments générés par la source thermale seront ainsi clairement identifiées d'un point de vue géologique et la lumière est faite sur les informations que peuvent apporter ces archives sédimentaires concernant la nature et la diversité des aménagements anthropiques et des activités humaines.

B.I. LE SITE ARCHÉOLOGIQUE DE JEBEL OUST DANS SON ENVIRONNEMENT.

B.I.1. Le cadre archéologique.

B.I.1.1. La découverte du site et les différentes opérations archéologiques.

Signalé pour la première fois en 1862, ce n'est qu'en 1907, parallèlement à la redécouverte de la source chaude par un prospecteur minier, que le site fut l'objet de premières fouilles archéologiques par des militaires du 4^e tirailleurs, à la demande du Docteur Carton (Carton, 1907). Celui-ci fit mettre au jour hâtivement les deux grands bassins rectangulaire et circulaire de l'édifice thermal antique dont les colonnes émergeaient alors de terre. Ces premiers dégagements concernèrent également le secteur du temple, en amont, où aurait été découverte une inscription de *Mercure Silvanus*. La poursuite de ces travaux fut effectuée par le capitaine Petitjean qui découvrit, entre autre, la partie inférieure d'une porte triomphale intacte et qui allait donner son premier nom aux vestiges archéologiques, *Henchir Bab-Khalled*.

A la suite de ces premières opérations, L. Berthon et l'Institut de Carthage organisèrent une excursion le 15 mars 1914, à laquelle participèrent quatre-vingt trois autres personnes dont le Dr. Carton, et dont l'objet était la visite des sites antiques d'Oudna et de Jebel Oust (Berthon, 1914). Au cours de la visite de Jebel Oust, un aperçu de l'environnement géologique du site y fut présenté, et l'histoire de la redécouverte des eaux thermales par D. Gérini, prospecteur minier, fut également rapportée. Une rapide visite des différentes ruines dégagées au cours des années précédentes fut effectuée, au cours de laquelle les visiteurs purent admirer l'exceptionnelle préservation des deux grands bassins, possédant encore l'ensemble de leurs colonnes, de leurs murs et de leurs escaliers. Il est intéressant de noter également la première notification, bien qu'involontaire, des importants dépôts sédimentaires préservés dans ces bassins. En effet, L. Berthon fait part d'un « enduit de ciment » très résistant et revêtant les piscines, mais dont « l'état de conservation inquiète les savants ». Il semble évident qu'il observe en fait les dépôts naturels engendrés par l'eau de la source thermale, c.-à-d. les travertins, qu'il confond involontairement avec des formations anthropiques, en l'occurrence un enduit.

Le site fut ensuite délaissé pendant des dizaines d'années, jusqu'en 1962 et une reprise des fouilles menées par l'institut national d'Archéologie et d'Art sous la direction du regretté Mohammed Fendri. Celui-ci fit dégager les trois ensembles actuellement visibles, c'est-à-dire la zone du sanctuaire et de ses annexes, la zone des thermes et des structures attenantes, ainsi que les grandes citernes bordant le site au sud. Ne subsistent, à notre connaissance, comme documentation de ces importantes opérations archéologiques qu'un plan incomplet de la zone cultuelle, un plan complet des thermes réalisé par T. Trikki, architecte de la mission, et un nombre considérable de photographies de fouilles. M. Fendri a également publié un article concernant les mosaïques des salles accolées aux thermes (Fendri, 1965) ainsi qu'une petite note sur le thermalisme à travers les siècles (Ben Abed et Scheid, 2003, 2005).

Actuellement, et depuis l'année 2000, une mission franco-tunisienne, dirigée par A. Ben Abed (Institut National du Patrimoine) et J. Scheid (Collège de France) et mettant en œuvre différents spécialistes (architectes, mosaïstes, archéologues, topographes, dessinateurs, céramologues et géoarchéologues), est en charge de l'étude du site. Cette mission a pour principal objectif de relever, étudier et publier à la suite des fouilles de M. Fendri et de mettre en œuvre un programme de consolidation et de protection des pavements en mosaïque et en *opus sectile*. Les résultats de ces recherches ont fait l'objet de brefs comptes-rendus annuels dans la chronique des activités de l'Ecole française de Rome publiée dans les MEFRA (Mélanges de l'Ecole Française de Rome). Un exposé synthétique des résultats des cinq premières années de fouilles a également fait l'objet d'une publication (Ben Abed et Scheid, 2005).

B.I.1.2. Le contexte « hydroarchéologique » nord tunisien : le circuit de l'eau entre Zaghouan et Carthage.

La partie orientale du Maghreb, territoire correspondant à peu près à la Tunisie actuelle, avait la particularité à l'époque antique d'être une des plus grandes provinces romaines et l'unique à porter le nom officiel d'*Africa* (Slim et Fauqué, 2001). Avec une période d'occupation s'étalant du I^{er} au VI^e s. de notre ère, le site de Jebel Oust est une colonie romaine située en Afrique proconsulaire, province romaine englobant la colonie de Carthage et la partie nord de l'actuelle Tunisie. Le site est situé sur la voie antique reliant Carthage au site de *Thuburbo maius*, à mi-chemin entre *Vthina* (Oudna) et *Thuburbo*.

Il pourrait donc s'agir du site d'*Onellana* mentionné sur la Table de Peutinger* (Fig. B.1), comme cela a été suggéré (Ben Hassen et Maurin, 1998). Cependant, une incertitude demeure encore à ce sujet, puisque que si la localisation et la situation du site peuvent éventuellement correspondre, la ville d'*Onellana* n'est pas légendée comme un édifice thermal ni comme un point d'eau sur cette carte.

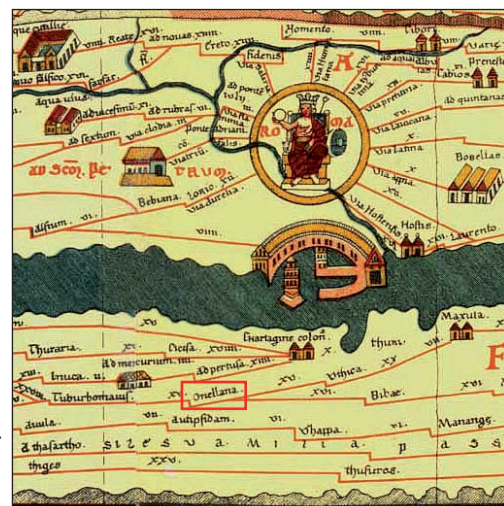


Figure B.1.
Localisation du site d'*Onellana* (encadré) sur
la Table de Peutinger (extrait).

La situation géographique de Jebel Oust est d'autant plus intéressante que le site est au cœur du circuit de l'eau menant de Zaghouan à Carthage (Fig. B.2), sur le parcours de l'aqueduc antique de Carthage, long de 120 km et construit sous le règne de l'empereur Hadrien¹. Ce circuit de l'eau met en jeu les sources karstiques froides du mont Zaghouan, à environ 20 km au sud de Jebel Oust, auxquelles sont associés le célèbre « Temple des Eaux » et le point de départ principal de l'aqueduc de Carthage (1 sur Fig. B.2). Cet aqueduc (3 sur Fig. B.2), après sa naissance au pied du mont Zaghouan, chemine à travers la plaine alluviale de l'oued Miliane, en contournant le jebel Oust par l'ouest. Continuant son chemin en direction du nord, et passant notamment au voisinage du site d'Oudna, l'aqueduc termine sa course dans les immenses citernes de *La Malga*, à Carthage (4 sur Fig. B.2).

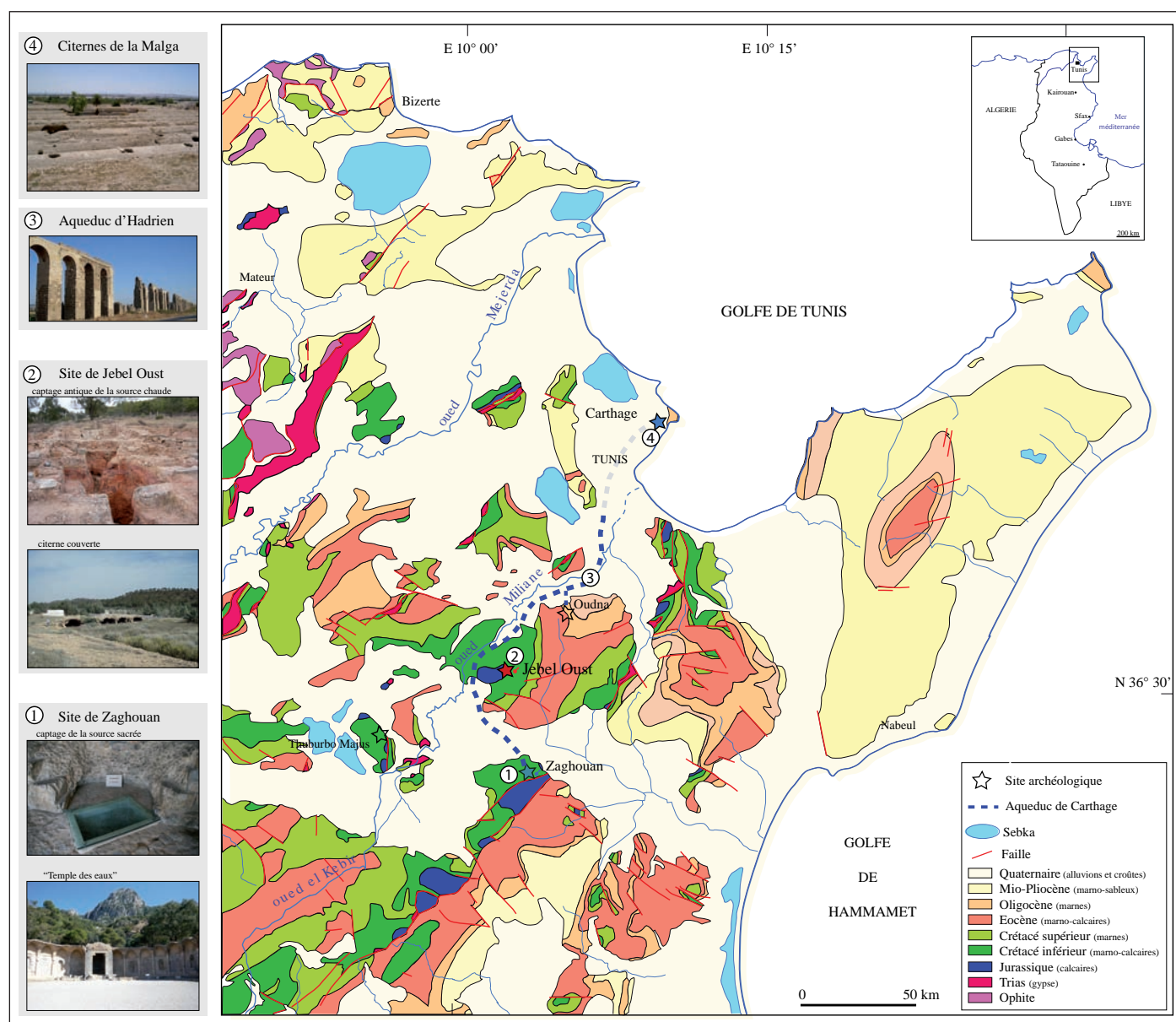


Figure B.2. Le contexte hydroarchéologique nord-tunisien : le circuit de l'eau entre Zaghouan et Carthage, représenté sur la carte géologique (d'après Jauzein, 1967).

¹ Cet aqueduc, tout du moins son tracé et certaines portions antiques, est encore en fonctionnement de nos jours et alimente en eau douce une partie de la ville de Tunis.

Au sein de ce complexe « hydroarchéologique » nord-tunisien, le site de Jebel Oust (2 sur Fig. B.2) occupe une place particulière par le biais de deux phénomènes. Le premier consiste en un système complexe de captage des eaux d'un oued alimentant un ensemble de trois grandes citernes qui servaient certainement de réservoir secondaire à l'aqueduc de Carthage. Le second fait est la présence d'une résurgence d'eau chaude sur le versant oriental du Petit Oust, à l'origine des aménagements culturels et thermaux bâtis dès l'époque romaine. La présence de cette source chaude est à replacer dans le contexte des manifestations thermales dans la région du nord-est de la Tunisie. Il existe actuellement plusieurs sources chaudes dans le Nord-Est tunisien, dont la plupart sont localisées dans la région du Cap Bon (gouvernorat de Nabeul) et une, la source chaude de Hammam Zriba, dans la région située au sud du mont Zaghouan. Deux autres sources chaudes sont présentes au voisinage de Tunis, Hammam Ain El Ariane et Hammam Ain El Bey, mais restent encore archéologiquement mal documentées. Dans le contexte hydro-archéologique nord-tunisien, **la résurgence thermique de Jebel Oust est l'une des uniques sources chaudes exploitées sur le trajet entre Carthage et Zaghouan, ou sur la voie antique menant de Carthage à *Thuborbo Maius*.**

B.I.1.3. Les structures romaines du site archéologique de Jebel Oust.

B.I.1.3.1. Les grands ensembles.

Le site antique nommé « Jebel Oust » est établi sur le versant oriental de la montagne homonyme, à une trentaine de kilomètres au sud de Tunis, sur la route de Zaghouan. Sur le flanc oriental de la montagne, une source hydrothermale, captée pour alimenter un établissement balnéaire moderne, présente un événement naturel qui est à l'origine de l'implantation antique. La première occupation du site peut être datée du début du I^{er} s. apr. J.-C., aucun indice archéologique de fréquentation de ce versant avant l'époque romaine n'a été repéré, jusqu'à son abandon à la fin du VI^e siècle.

Le site est composé de deux ensembles principaux (Fig. B.3) : un **premier ensemble**, constitué de **trois grandes citernes** longeant le lieu au sud et un second correspondant à un ensemble de bâtiments construits autour de l'événement de la source hydrothermale aujourd'hui tarie. Les citernes, dont nous savons qu'elles captaient les eaux d'un oued voisin par un système relativement complexe, ne dérivait qu'une partie minime de leur réserve vers le site antique et l'une d'entre elles, qui reçoit l'essentiel de l'eau captée, se situe en contrebas du site. Ainsi, il est tentant de penser que ces citernes servaient principalement de réservoir secondaire au célèbre aqueduc de Carthage, débutant au pied du jebel Zaghouan au niveau de la source du *Nymphée*, et qui passe à environ deux kilomètres du site de Jebel Oust.

Le **second ensemble**, plus complexe, comprend **trois secteurs** échelonnés le long du versant et sont l'objet des études actuelles menées par l'équipe franco-tunisienne. Au sommet se trouve **le sanctuaire** et ses annexes, construits directement à l'aplomb d'une cavité hydrothermale où prenait naissance la source chaude à l'époque antique (Fig. B.4). De nos jours, l'eau thermique est captée artificiellement à environ 200 m au nord du site antique, avec une température avoisinant les 55° C. En amont du temple se trouve une vaste citerne

d'eau douce alimentée à partir de l'oued voisin. Cette citerne, le temple et le portique sur lequel il s'ouvre, tels qu'ils apparaissent sur la fig. 2, correspondent à la deuxième phase du sanctuaire (cf. *infra*), datée du II^e s. Le captage de la source se situe à l'aplomb du *pronaos* du temple dont nous ignorons à quelle divinité il était dédié. A partir probablement du IV^e siècle, le *téménos* s'ouvre sur un *clivus* est-ouest auquel on accédait à partir d'une large rue. A l'est et légèrement en contrebas de celle-ci, se développe une place ceinte d'un portique en U au fond duquel se trouve la porte d'accès à l'**édifice thermal**. Le niveau de circulation de celui-ci se situe à environ 8 m en-dessous de celui du *téménos*.

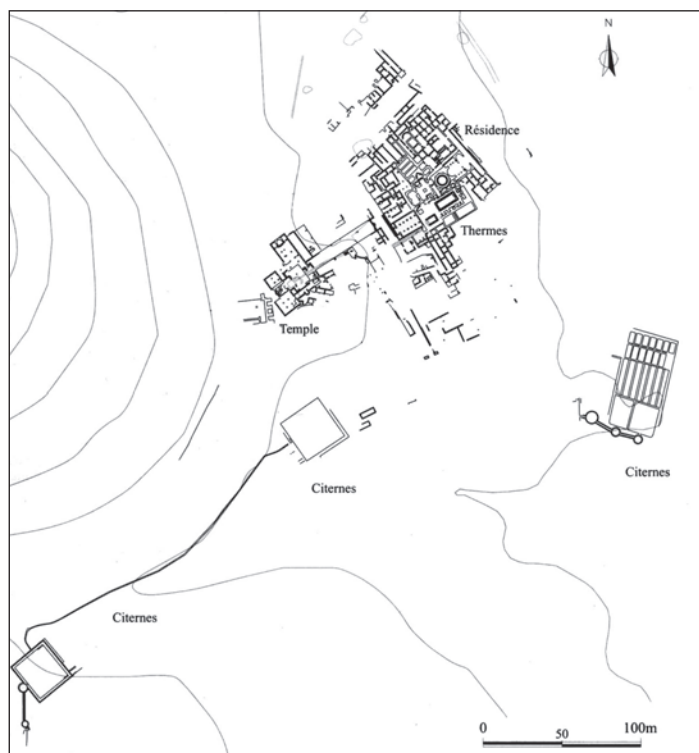


Figure B.3. Les deux ensembles principaux du site de Jebel Oust (plan Mission archéologique franco-tunisienne de Jebel Oust) : citernes et temple/thermes/résidence.

Environ 90 m séparent les thermes du captage et le tracé de l'adduction en eau thermique a été reconnu d'une extrémité à l'autre, au sud du *clivus* et de la place. En revanche, si la course de l'aqueduc thermal acheminant l'eau chaude est bien connue, nous ignorons encore le cheminement de la conduite d'eau douce qui, partant de la citerne haute, alimentait la(es) citerne(s) des thermes. Nous savons pourtant que celle-ci doit exister puisque, dans les thermes, nous avons les preuves archéologiques d'une alimentation en eau douce, doublée à l'alimentation en eau issue de la source thermique captée (cf. *infra*).

Légèrement en contrebas des thermes, s'étend une *villa* de l'Antiquité tardive qui, suite probablement aux constitutions de Gratien et Théodose autorisant le démantèlement des biens religieux, annexa l'édifice thermal dont l'accès fut reporté à l'est, au sein même de la *villa*. La fouille a en effet prouvé que le vestiaire des thermes, essentiel pour le fonctionnement d'un édifice public, cesse d'être utilisé précisément à la fin du IV^e siècle.

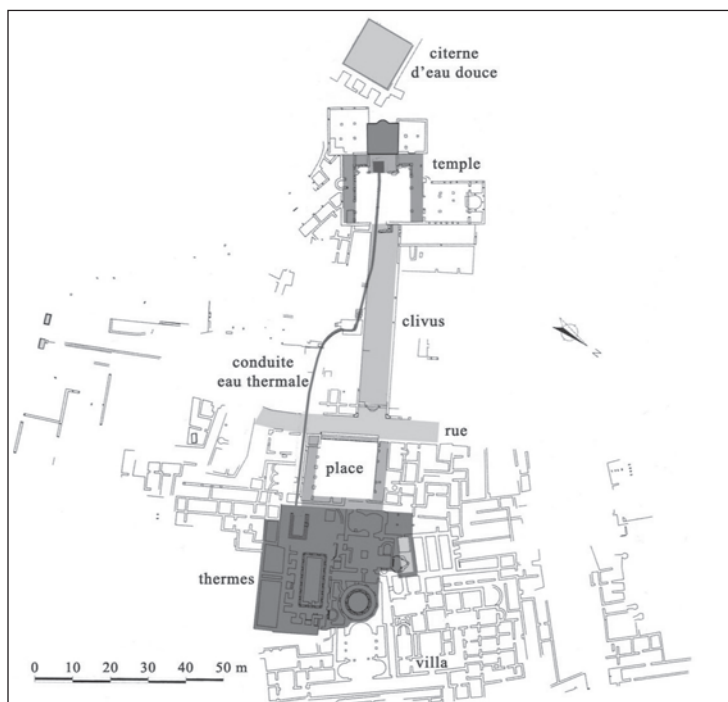


Figure B.4.

Plan partiel du site de Jebel Oust, éch. 1: 2000 (Mission archéologique de Jebel Oust). Le temple tel qu'il est représenté, précédé d'une cour à portique, correspond au réaménagement du sanctuaire originel au II^e s. ap. J.-C.

B.I.1.3.2. Le phasage chronologique du sanctuaire.

Le secteur du temple est aménagé autour de l'évent antique de la source thermique, en haut de versant. Les premiers travaux réalisés par la mission franco-tunisienne ont permis de restituer **trois phases** de construction et d'utilisation des alentours immédiats de la source (Ben Abed et Scheid, 2005).

De la **première phase** subsistent essentiellement des vestiges conservés sous le *pronaos* et l'escalier du second temple et qui semblent correspondre aux restes de la *cella* d'un premier temple. Celui-ci était alors établi de plain-pied devant l'évent de la source, qui se présentait alors sous la forme d'un petit puits profond d'environ 1,80 m. Autour de cette première *cella*, une cour dont l'accès s'effectuait par une porte ouvrant à l'est, ainsi que deux exèdres à plan rectangulaire se faisant face au nord et au sud, complétaient ce premier aménagement. La datation de cet ensemble originel, rendue possible grâce aux niveaux de comblement générés par la deuxième phase d'aménagement du temple et quelques éléments matériels de construction retrouvés sporadiquement¹, remonte au premier siècle de notre ère.

La **seconde phase** du sanctuaire correspond à la monumentalisation du lieu de culte et date de la seconde moitié du II^e siècle. Un large « puits », profond d'environ 6 m, est creusé sous la *cella* du premier temple. Le nouveau temple fut édifié au fond d'une cour cernée par un portique en U, à un niveau légèrement plus haut que la première phase. Afin d'éviter de surplomber le large trou constituant le nouveau puits, la *cella* du deuxième temple fut rejetée vers l'ouest et le premier puits fut comblé. Le nouveau puits se prolonge par une

¹ Deux colonnes de grès revêtues de stuc renvoyant au début de l'Empire furent découvertes, ainsi qu'une plaque fragmentaire ornée d'une inscription témoignant d'une vie religieuse au début de l'année 101 (Ben Abed et Scheid, 2005).

cavité souterraine d'où sourdait l'eau thermale et qui, nous le verrons, présente certaines traces d'activités humaines. Les parois nord et sud du puits furent aménagées afin de recevoir une voûte pour soutenir l'escalier et le *pronaos* du nouveau temple.

C'est sans doute vers la fin du IV^e siècle que le secteur sacré connut à nouveau un changement. Lors de cette **troisième phase**, de nouvelles salles apparaissent de part et d'autre de la *cella* ainsi que des ouvertures dans le mur ouest du portique. Un baptistère fut installé au centre de la *cella* auquel on accédait par une porte percée dans le mur sud du temple, et une basilique fut construite sur le côté nord du portique. Contrairement au cas classique où la basilique est directement implantée sur le sanctuaire romain, comme sur le site *Thuburbo Maius*, à Jebel Oust celle-ci est reportée quelques mètres au nord ; cette singularité peut s'expliquer par le fait d'un effondrement des structures surplombant la cavité hydrothermale, laissant place à un trou béant qui interdit ainsi toute nouvelle installation (ce point, en cours de discussion au sein de l'équipe de recherche de Jebel Oust, sera abordé ultérieurement dans ce manuscrit).

B.I.1.3.3. Le phasage chronologique des thermes.

Cinq grandes phases ont pu être individualisées, dont les quatre premières correspondent à des agrandissements successifs de l'édifice lors de son fonctionnement en tant qu'édifice public lié au sanctuaire païen et une phase de transformation puis de régression progressive liée à son utilisation en tant que bain privé¹. Pour une plus grande clarté de l'exposé, cette partie, à l'instar de celle concernant la zone sacrée, intègre déjà les résultats de l'étude géoarchéologique détaillée par la suite.

Nous ne savons que peu de choses sur la **phase I** dont la plupart des espaces ont été oblitérés par les aménagements des phases ultérieures. Il est probable qu'elle soit contemporaine de la réfection du temple au milieu du II^e siècle.

De la **phase Ibis** subsiste essentiellement le bassin T5 qui était, comme nous le verrons, une grande piscine tiède à ciel ouvert, ceinte d'un portique et directement alimentée par la canalisation d'eau thermale. Nous ignorons tout des autres bassins contemporains de celui-ci.

A quelques détails près, le plan de l'édifice de la **phase II** est connu dans son intégralité (Fig. B.5). On accède au vestibule T17, de plan en forme de sablier, à partir de la place qui jouxte les thermes à l'ouest. Ce vestibule donne accès au nord au vestiaire T24, au sud à des petites salles dont nous ignorons la fonction et à l'est à un vaste *frigidarium* de plan carré (T14) pourvu de trois bassins périphériques et d'un bassin central. Au nord de ce *frigidarium* se trouve la citerne d'eau douce T18. Dans cette phase, la piscine tiède T5 (Fig. B.6) est conservée à l'identique tandis qu'un *caldarium* (T9) de plan circulaire (fig. B.7) couvert d'une voûte annulaire et d'une coupole est construit *ex nihilo*, probablement à l'emplacement du *caldarium* de la phase

¹Le phasage chronologique des thermes de Jebel Oust a été présenté lors du colloque Balnéorient « *βαλανεῖα, thermes et hammams*, 25 siècles de bain collectif » (Damas, 6-9 novembre 2009), dont les actes sont en cours de parution : Broise, H. et Curie, J. – Contribution à l'étude des travertins carbonatés à l'analyse diachronique, fonctionnelle et architecturale des thermes : l'exemple des thermes du sanctuaire de Jebel Oust (Tunisie).

précédente. Cette nouvelle piscine est alimentée directement en eau thermale. A ce stade, la morphologie des salles chaudes est tout à fait comparable à celle des thermes d'Aquae Flavianae (Fig. B.8).

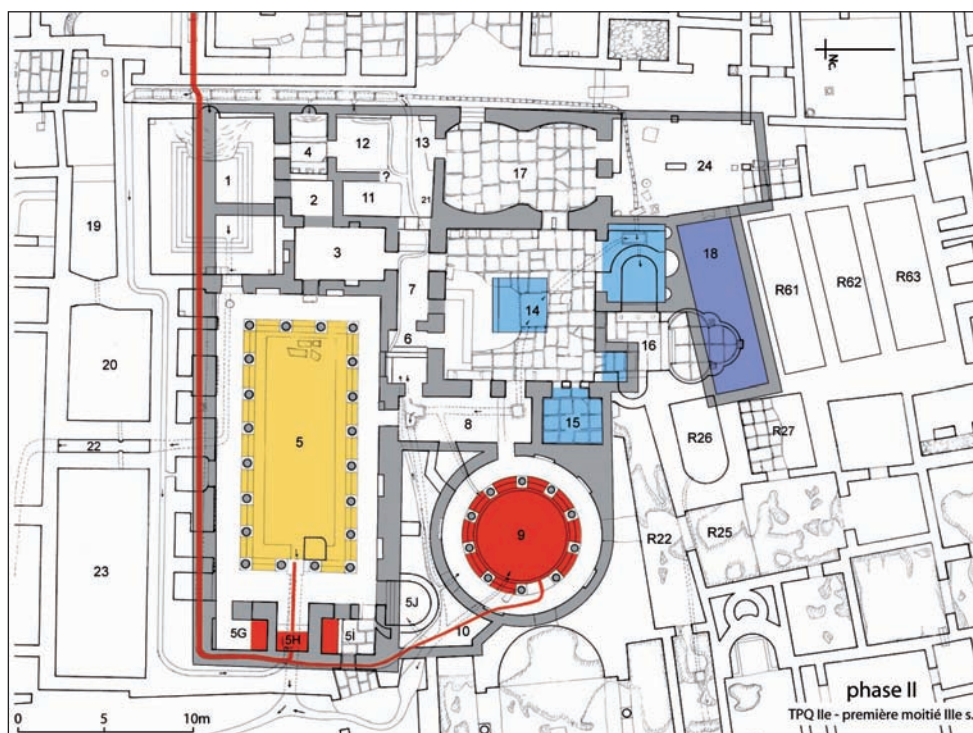


Figure B.5. Plan des thermes de Jebel Oust dans la phase II, respectivement en bleu, jaune et rouge, le eaux froides, tièdes et chaudes (éch. 1: 500, Plan : H. Broise et J. Curie).



Figure B.6. Thermes de Jebel Oust, piscine T5. Vue vers l'est.



Figure B.7. Thermes de Jebel Oust, piscine T9. Vue vers le nord-est.

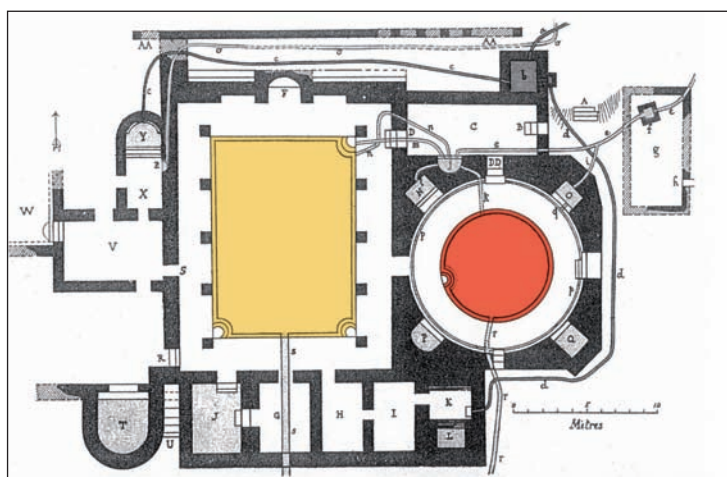


Figure B.8. Plan des thermes d'Aquae Flavianae (éch. 1: 500, fond de plan Gsell et Graillot, 1893, pl. VIII).

La **phase III** (fig. B.9) correspond à une volonté d'augmenter la capacité d'accueil de l'édifice, avec l'érection d'un second *caldarium* (T1) à l'angle sud-ouest du bâtiment, tout en créant parallèlement une série de petits bassins tièdes couverts. Contrairement à la piscine T5 où l'eau thermique tiédissait dans la piscine elle-même puisqu'elle était à ciel ouvert, la création de bassins tièdes couverts impliquait de trouver une alternative pour refroidir l'eau. D'après Sénèque (*Questions Naturelles*, III, 24), deux solutions étaient possibles, **refroidir l'eau thermique avant de l'injecter à l'intérieur des bassins ou la mélanger avec de l'eau froide à l'intérieur des bassins mêmes**. Les deux procédés ont été mis en œuvre à Jebel Oust. Deux séries de bassins de refroidissement (en vert sur Fig. B.9) ont été mises en place. Au sud, les trois bassins accolés à la façade alimentent les deux petits bassins T5C et T5D ainsi que les deux pédiluves situés dans les angles sud-est et sud-ouest de la salle. A l'ouest, entre le nouveau *caldarium* et le vestibule, les pièces préexistantes sont détruites pour faire place à une cour entièrement occupée par quatre bassins de refroidissement qui alimentent ceux des salles T4 et T7. Le bassin T6 en revanche, situé au cœur de l'édifice, loin des bassins de refroidissement, reçoit à la fois de l'eau chaude et de l'eau froide.

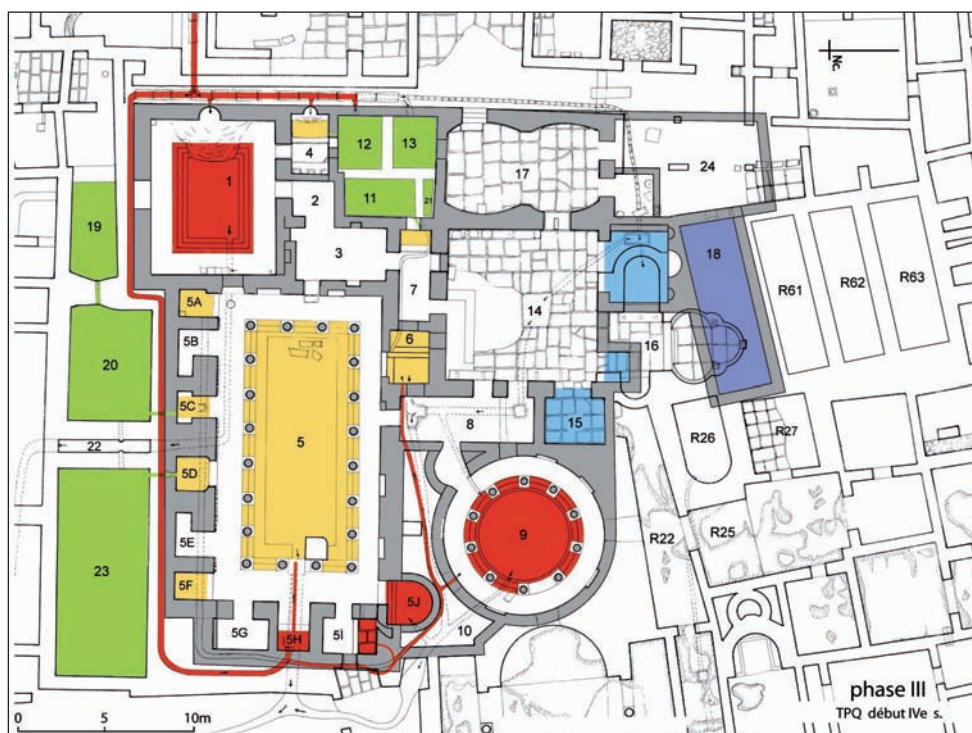


Figure B.9. Plan des thermes de Jebel Oust dans la phase III, en vert les bassins de refroidissement à l'air libre (éch. 1: 500, Plan : H. Broise et J. Curie).

La **phase IV** (Fig. B.10), datée du début du VI^e siècle, correspond à l'annexion des thermes par la villa. L'accès des bains se situe désormais à l'est, à l'extrémité d'un long couloir (R22) auquel on accède à partir d'une grande galerie de distribution interne à la villa, couloir qui débouche directement dans le *frigidarium*. Ce changement de statut est contemporain de la construction de la batterie de citernes (R61) approvisionnant la villa. Ces citernes d'eau douce, mitoyennes de la citerne (T18), sont alimentées par le biais de cette dernière, preuve supplémentaire du changement de statut de l'édifice. Jusqu'à la fin définitive des activités thermales, le *frigidarium* sera l'objet de nombreux remaniements affectant essentiellement les bassins. Nous ignorons quelles furent les piscines chaudes maintenues en activité lors de l'annexion des thermes par la villa ; très

certainement, pour le moins, celle de la rotonde T9 qui, avec les bassins tièdes T6 et T7 et le *frigidarium*, constituent un ensemble cohérent.

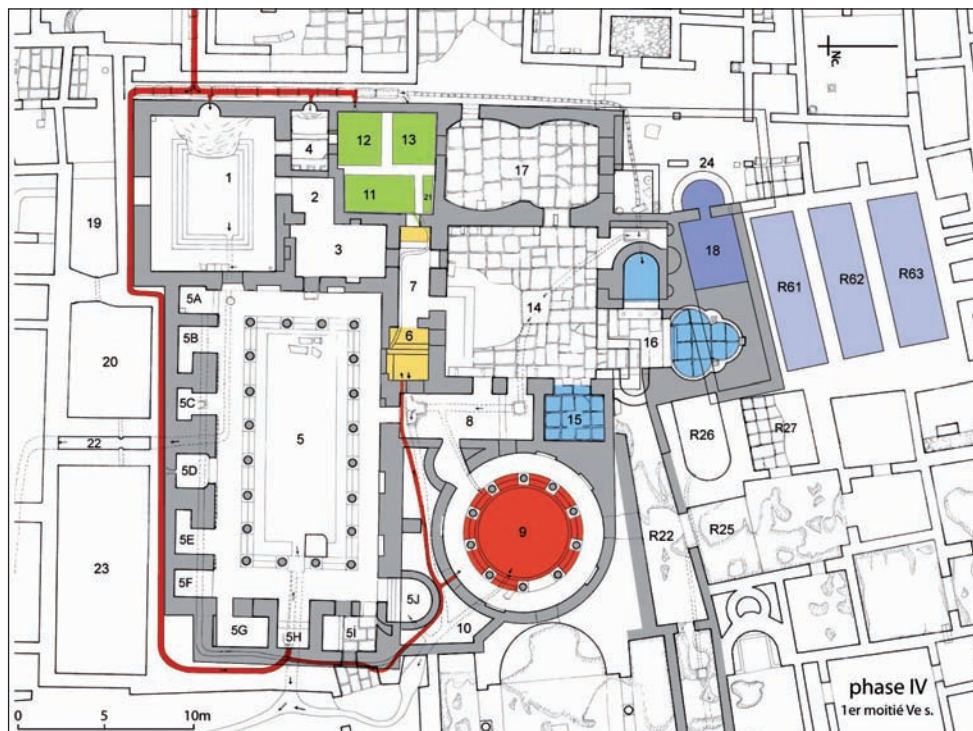


Figure B.10. Plan des thermes de Jebel Oust dans la phase IV (éch. 1: 500, Plan : H. Broise et J. Curie).

L'avant-dernier état de la phase IV (Fig. B.11), dans la première moitié du VI^e s., marque l'abandon de la salle T9 en tant que *caldarium* ; son sol est alors recouvert d'une nappe d'eau d'une vingtaine de centimètres et elle remplit désormais la fonction de bassin de refroidissement alimentant l'un des bassins du *frigidarium* transformé en bassin tiède (T15). Parallèlement la salle T6/T7 est transformée en *caldarium* avec adjonction d'un sas thermique construit au détriment du *frigidarium*.

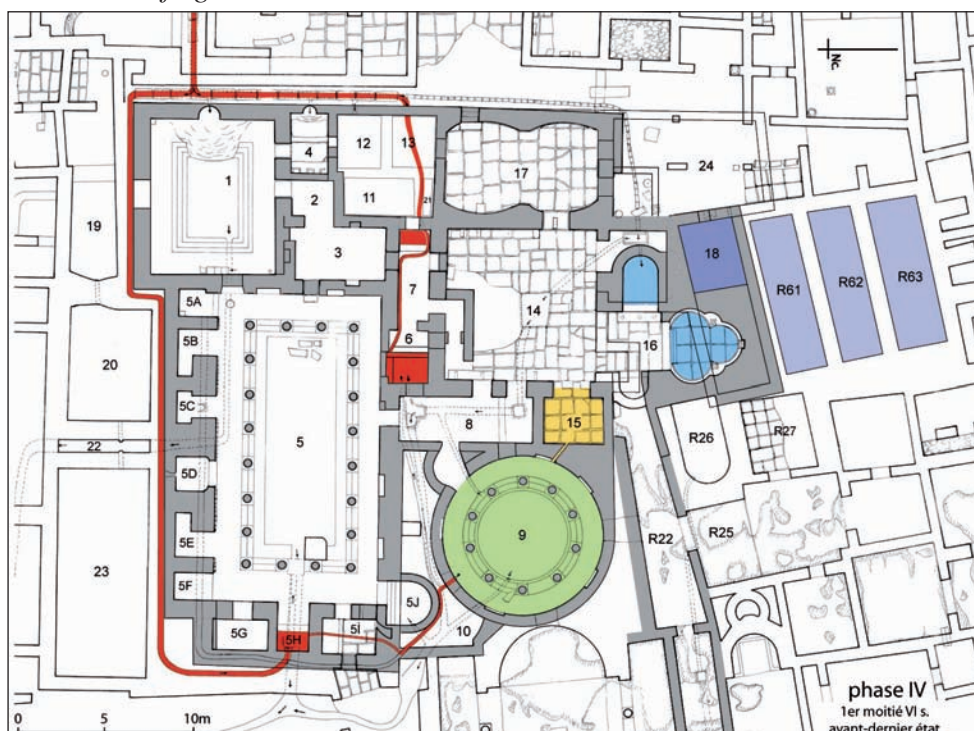


Figure B.11. Plan des thermes de Jebel Oust dans la phase IV, avant-dernier état (éch. 1: 500, Plan : H. Broise et J. Curie).

Le dernier état (Fig. B.12) correspond à la construction d'un petit bain public rudimentaire qui vient s'adosser à la façade orientale des thermes, tout en réutilisant la petite salle T5I. Ce bain auquel on accédait par une impasse ouvrant vers le sud et longeant la façade de l'édifice comportait un vestiaire/*tépidarium*, un *laconicum*, et un espace de service créés *ex nihilo*, tandis que le *caldarium* était installé dans l'ancien espace T5I. La construction de ce bain eut pour conséquence immédiate de couper l'arrivée d'eau thermique qui alimentait la salle T9 et donc le bassin tiède T15. Pour remédier à cela, une canalisation rudimentaire fut construite afin d'acheminer l'eau thermique vers le bassin triconque du *frigidarium*, lequel devient ainsi un bain tiède dans lequel eau froide et eau thermique pouvaient être mélangées.

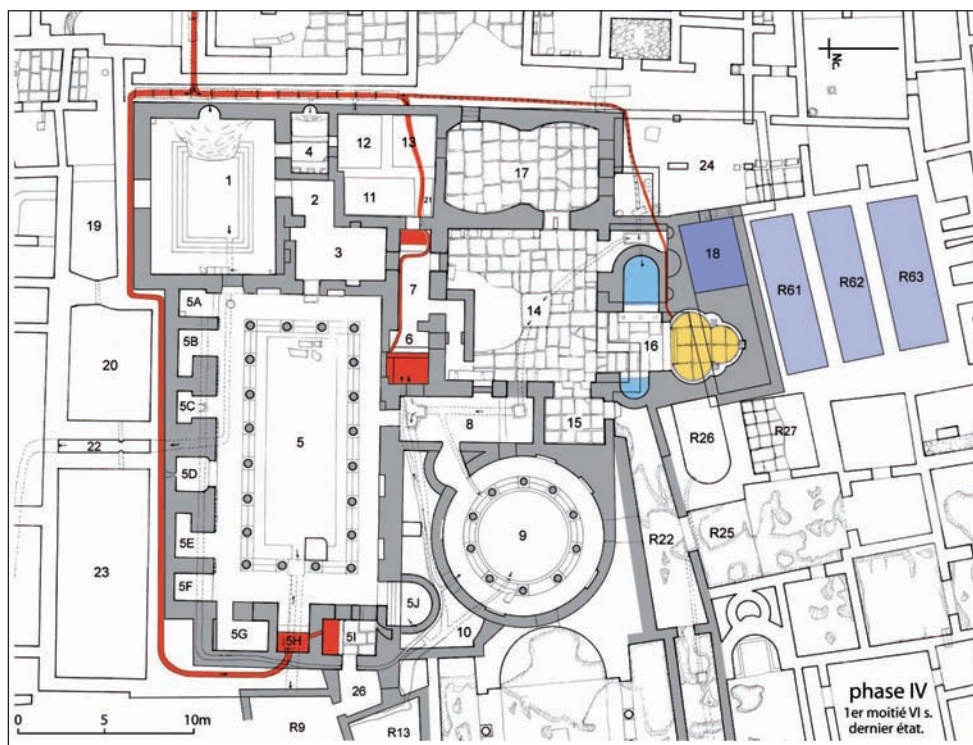


Figure B.12. Plan des thermes de Jebel Oust dans la phase IV, dernier état (éch. 1: 500, Plan : H. Broise).

Dans le courant de la deuxième moitié du VI^e siècle toute activité thermique organisée cesse.

B.I.1.4. Les pierres de construction utilisées sur le site antique de Jebel Oust.

« L'ordre des matières veut que je parle maintenant des carrières
d'où l'on extrait les pierres de taille et les moellons
qui servent à la construction des bâtiments. »

Vitruve (I^{er} s. av. J.-C.)

L'étude pétrographique réalisée sur les matériaux de construction utilisés sur le site antique de Jebel Oust a permis de distinguer plusieurs types de roches exploitées dans les différents secteurs du site. Les résultats de cette analyse pétrographique nous permettent de proposer des conclusions sur l'économie de la construction et des matériaux employés sur le site de Jebel Oust. Cette partie est hiérarchisée selon l'importance d'exploitation du matériau considéré, du matériau le plus exploité aux matériaux utilisés de manière exceptionnelle.

B.I.1.4.1. Le calcaire gris de Jebel Oust : la pierre qui a construit le site.

Le calcaire gris de Jebel Oust est le matériau le plus exploité et le plus abondant dans les bâtiments antiques du site antique. Il se présente le plus souvent en blocs compacts ou en plaques de quelques centimètres d'épaisseur, et ses teintes varient du gris au bleu violacé. Il apparaît parfois veiné de filons de calcite plus ou moins fins, qui témoignent de son origine très locale puisque ces filons sont identifiés à moins de 300 m dans la carrière antique du jebel Oust. Ce calcaire de la région, daté du Lias (Jurassique inférieur), constitue le cœur de l'anticlinal* rehaussé par le jeu de plusieurs failles, formant ainsi le mamelon du Petit Oust (cf. *infra*). Outre la carrière antique précédemment citée, il existe plusieurs fronts de taille d'époque antique dispersés sur les versants du Petit Oust (Fig. B.13). Ce calcaire gris présente deux aspects : des blocs massifs, compacts et homogènes, présentant des surfaces éclatées au pic, et des dalles de 4 à 5 cm d'épaisseur, montrant des surfaces irrégulières car très bioturbées (aspect noduleux) et parfois riches en fossiles d'ammonites.



Figure B.13. Carrière de calcaire gris sur le versant du Petit Oust.

Le calcaire gris a été utilisé pour certaines harpes de l'*Opus africanum* des murs, mais son utilisation principale réside dans le dallage de sols (Fig. B.14), les colonnes (Fig. B.15) et dans l'appareil des murs, alors qu'il n'est que très rarement utilisé comme moellons dans l'appareil des murs de la résidence (*villa*) et des thermes.



Figure B.14. Dallage en calcaire gris de Jebel Oust du sol de la salle T17 des thermes.



Figure B.15. Colonne en calcaire gris de la salle T9 des thermes de Jebel Oust.

B.I.1.4.2. Les croûtes calcaires : une utilisation en moellons et une exploitation locale.

Ce faciès typique de croûte pédogénétique, dont l'apparence montre une certaine zonation calcitique, se présente sous la forme de pierres rosées alvéolées et/ou conglomératiques, de taille centimétrique, et caractérisées par une absence de traces d'outils. Malgré son aspect irrégulier, cette pierre a été utilisée très majoritairement pour les moellons des murs des thermes et de la résidence (Fig. B.16), constituant le blocage de l'*Opus africanum*. Son origine est évidemment locale et est probablement située dans la plaine alluviale bordant le Jebel Oust, mais aucune carrière d'exploitation romaine n'a encore été repérée, à ce jour.



Figure B.16. Moellons en croûte calcaire dans les murs des thermes de Jebel Oust.

B.I.1.4.3. Les calcaires lacustres : un matériau de qualité médiocre, exploité localement.

Il s'agit d'une roche calcaire dont les teintes varient du gris au beige clair, caractérisée par sa grande porosité, lui donnant ainsi un aspect très vacuolaire. Son faciès présente des lamines blanchâtres, visibles à l'œil nu, issues d'une précipitation carbonatée. Cette roche correspond très certainement à un calcaire lacustre. Son origine pourrait être à rechercher relativement très localement, au niveau de dépôts tertiaires environnant le Jebel Oust, mais les affleurements n'ont, à ce jour, pas encore été reconnus.

Ce calcaire lacustre, qui ne comporte aucune trace d'outils, est utilisé dans les bâtiments antiques pour des

colonnes des thermes (Fig. B.17) et pour un grand nombre de harpes de la résidence et des thermes, ainsi que pour des moellons d'angle, des tableaux de porte, et des plaques de seuils de porte. Si cette roche devait être très facile à tailler, en revanche, elle n'est guère résistante aux agents météoriques, en témoigne sa conservation différentielle pour les colonnes de la salle T5 des thermes.

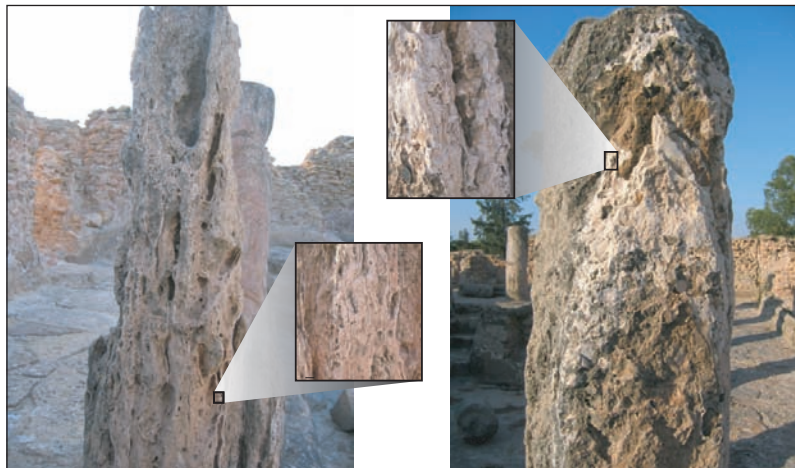


Figure B.17.
Colonnes en calcaire lacustre de la
salle T5 des thermes de Jebel Oust,
et détail des lamines précipitées.

B.I.1.4.4. Les travertins : un matériau particulier exploité *in situ*.

Le travertin est exploité de deux façons à Jebel Oust et utilisé pour deux types d'éléments différents.

• L'exploitation du travertin « naturel ».

Nous appelons travertin « naturel » le travertin qui s'est déposé sur le versant du Petit Oust avant l'occupation humaine et l'exploitation de la source chaude. Ce type de travertin a été extrait lors du creusement de l'aqueduc dont la course débute au niveau du captage de la source chaude, et qui achemine l'eau thermale aux thermes. Le matériel ainsi extrait (Fig. B.18) a servi directement pour les dalles de couverture de cet aqueduc (Fig. B.19).



Figure B.18. Rainures d'extraction dans le travertin naturel du site
de Jebel Oust.



Figure B.19. Dalles de couverture en travertin de l'aqueduc
thermal antique de Jebel Oust.

• L'exploitation du *travertin anthropique*.

Nous avons quelques preuves de l'exploitation et l'utilisation du travertin déposé dans les structures antiques. Dans les dépôts de travertin recouvrant les parois de la salle T23 des thermes, apparaissent des échancrures (Fig. B.20) qui sont certainement des vestiges de l'extraction du travertin. Débité en petits blocs, le travertin est employé dans l'appareil de certains murs des thermes, afin d'égaliser les parois avant la pose de l'enduit dans la salle T5I (Fig. B.21), ou en véritable moellon dans la salle T6 (Fig. B.22).



Figure B.20. Echancrures verticales dans le travertin de la salle T23 des thermes, certainement pour une extraction du sédiment.



Figure B.21. Utilisation du travertin dans le mur de la salle T5I des thermes.



Figure B.22. Moellons en travertin dans le mur de la salle T6 des thermes.

B.I.1.4.5. La calcite filonienne de Jebel Oust : une extraction locale, une roche spécifique.

Cette calcite de type filonienne présente un faciès de très grands cristaux clairs et zonés (Fig. B.23), ou parfois de grands cristaux orangés veinés de rouge, ainsi que des veinules de couleur ocre. C'est une roche rare, extraite dans les filons de la carrière antique du Petit Oust (Fig. B.24), localisée à environ 300 m du site antique. Elle est utilisée pour quelques colonnes (d=35cm, h=70 cm) situées vers l'entrée est du *clivus*, pour quelques plaques de seuil et de tableau de porte ou quelques harpes (en probable réemploi) dans les thermes, ainsi que pour l'*opus sectile*. Le plus gros bloc sur le site correspond à un autel de statue (L=85 cm, l=80 cm, h=75 cm). Les qualités d'esthétisme visuel de cette calcite filonienne et sa ressemblance avec du véritable marbre l'amène à être considérée comme une roche décorative ou ornementale, lui conférant un rôle particulier dans les structures antiques. Cette roche est une brèche calcaire et ne doit pas être confondue avec une roche siliceuse de type onyx, bien que son aspect visuel s'en rapproche étroitement.

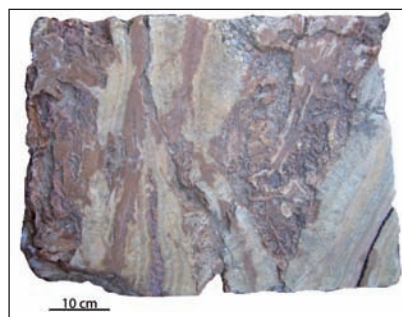


Figure B.23. Calcite filonienne de Jebel Oust.



Figure B.24. Filon de calcite filonienne dans la carrière antique de Jebel Oust.

B.I.1.4.6. Les matériaux utilisés occasionnellement.

- **Les oxydes rouges : une récupération locale.**

Ces roches sont parfois employées pour des moellons dans l'appareil des murs des thermes et de la résidence. Leur origine est locale : ces roches proviennent très certainement de l'extraction de matériaux issus des travaux réalisés lors de la phase de monumentalisation du temple, et en particulier lors du creusement du grand puits de captage de la source chaude. Ces aménagements ont engendré l'extraction d'une quantité considérable d'oxydes ferreux utilisés parfois pour aplanir certaines surfaces de circulation des bâtiments de la pente, et donc, en moellons dans l'appareil de certains murs.

- **Le calcaire marneux : une exploitation locale.**

Ce calcaire, très argileux et très friable, présente un aspect feuilleté et des variations de teinte allant du violet au jaune et rosé, ainsi que quelques veinules d'oxyde de fer empruntant un réseau de fines fractures. Les affleurements ont été reconnus sur les versants du jebel Oust (Fig. B.25) et, même si aucune zone d'extraction n'a pu être observée, son exploitation est néanmoins locale.

Il est utilisé pour quelques harpes dans l'appareil constituant les murs de la résidence, en particulier de la grande salle R16. Malgré ses qualités esthétiques certaines, cette roche n'a été que très peu employée, certainement à cause de son extrême fragilité.



Figure B.25. Affleurement du calcaire marneux sur le versant du Jebel Oust.

- **Les grès : une utilisation rare et une extraction régionale.**

Quelques moellons en grès sont observés dans l'appareil de certains murs des thermes et de la résidence, construits en *Opus africanum*. Aucun affleurement de grès n'existe dans l'environnement immédiat du site de Jebel Oust, ce qui exclue une exploitation locale. En revanche, ce type de matériau est largement exploité sur le site antique d'Oudna (*Vthina*), situé à une vingtaine de kilomètres au nord de Jebel Oust et pour lequel les carrières antiques de grès sont reconnues à proximité immédiate du site. C'est très certainement de ces carrières que proviennent les quelques grès utilisés sporadiquement sur le site de Jebel Oust.

• Quelques cas d'utilisation unique d'un matériau.

Deux matériaux sont, à ce jour, uniques sur le site de Jebel Oust. Il s'agit de l'escalier d'eau alimentant la salle triconque de T16 (Fig. B.26), construit en marbre blanc d'origine inconnue et d'un répartiteur d'eau (Fig. B.27) situé actuellement dans le *frigidarium* des thermes construit dans un calcaire bioclastique beige dont l'origine reste également encore inconnue.



Figure B.26. Escalier d'eau en marbre blanc de la salle T16 des thermes.



Figure B.27. Répartiteur d'eau en calcaire bioclastique situé actuellement dans les thermes.

Synthèse : une exploitation stratégique des ressources locales.

L'analyse pétrographique des matériaux de construction employés sur le site de Jebel Oust met en lumière une exploitation raisonnée des ressources locales. Des zones d'extraction ont pu être mises en évidence à proximité immédiate du site. Les bâtisseurs du site ont su profiter des grandes opportunités qu'offre le jebel Oust en termes de quantité et qualité des matériaux. Des roches dures et compactes, et abondantes sur le versant, tel que le calcaire gris, ont été utilisées dans le gros œuvre des bâtiments, tandis que des roches présentant certaines qualités esthétiques, comme la calcite filonienne, ont pu servir de roches ornementales. L'exploitation locale des matériaux est confirmée par l'utilisation ponctuelle du travertin nappant le versant et extrait lors du creusement de l'aqueduc, ainsi que par la récupération du travertin contemporain de l'occupation humaine, déposé dans certaines salles thermales. La quantité considérable de moellons nécessaire pour l'*Opus africanum* est assurée par l'exploitation d'une croûte calcaire provenant de la plaine alluviale qui borde le jebel Oust. Les roches importées sont très rares (marbre blanc) ou proviennent d'une région voisine (grès d'Oudna).

B.I.2. Le cadre environnemental du site archéologique de Jebel Oust.

B.I.2.1. Le cadre géologique : l'anticlinal faillé de Jebel Oust.

Le site archéologique de Jebel Oust est situé au cœur d'un large anticlinal dissymétrique d'orientation NE-SW, typique de la phase tectonique dite « atlasique » à l'origine également du synclinal isolant le jebel Oust des massifs de la Dorsale tunisienne (Jebel Zaghouan) et dans lequel s'installe la plaine alluviale de l'oued Miliane (cf. *supra*, Fig. B.2). La structure anticlinale de Jebel Oust, culminant à une altitude de 396 m, se trouve largement érodée ; près de 6000 mètres de sédiments ont pu être arasés au centre du dôme au cours des temps géologiques (Solignac, 1927 ; Jauzein, 1967 ; Rouvier, 1985). Les flancs du dôme du jebel Oust sont constitués de terrains crétacés, caractérisés par des séries essentiellement marneuses et une dissymétrie marquée par un pendage moyen de 20 à 30° pour le flanc Ouest et de 40 à 70° pour le flanc Est (Jauzein, 1967). Le cœur de la structure correspond à une mosaïque de blocs calcaires datés du Lias et remontés par un ensemble complexe de failles.

En plus d'être découpé en plusieurs îlots indépendants, ce cœur liasique, de caractère extrusif*, est faillé sur tous ses bords ; il en résulte un léger chevauchement du bord sud-est, où manquent les séries du Jurassique moyen et supérieur et le Lias se trouve ainsi en contact anormal avec les couches du Crétacé. La complexité de l'ensemble de failles rehaussant le cœur anticlinal rend le centre morphologique jurassique du dôme indépendant, comme en témoigne la direction Est-Ouest de ces séries, différente de l'orientation principale de la structure plissée. Cet ensemble de failles ou de fractures joue un rôle important dans la présence de sources sur le jebel Oust puisqu'il permet la remontée rapide des eaux souterraines, et notamment des eaux chaudes provenant d'un aquifère profond. Les couches du Trias, essentiellement gypseuses et salifères, constituent la semelle (niveau de décollement) du pli anticlinal de Jebel Oust. Si elles n'affleurent nulle part dans la région, elles sont cependant responsables de l'alimentation en saumures des eaux thermales de Jebel Oust, qui traversent donc ces couches lors de leur parcours souterrain. Comme nous pouvons le constater sur le MNT¹ de la région (Fig. B.28), le site archéologique de Jebel Oust est situé précisément sur le versant oriental d'un mamelon rehaussé par failles dans le secteur septentrional du jebel Oust, appelé le « Petit Oust », et qui culmine à l'altitude de 220 m.

L'influence de l'Homme dans le modelé du paysage régional est perceptible. D'importantes carrières de granulats exploitées pour l'empierrement des routes rongent actuellement l'ensemble du massif à un rythme soutenu (Fig. B.29). De plus, l'oued principal de la région, l'oued Miliane, qui contourne le jebel Oust par l'ouest, présente un tracé méandrique fortement encaissé. Cette profonde incision de l'oued principal, ainsi que la reprise de l'érosion des versants du jebel traduit par la formation d'un glacis alluvial* au pied du massif représentent probablement les témoins géomorphologiques de l'activité humaine dans la région (économie agropastorale, déforestation).

¹MNT = Modèle Numérique de Terrain, qui permet une représentation en 3D de la topographie de la région.

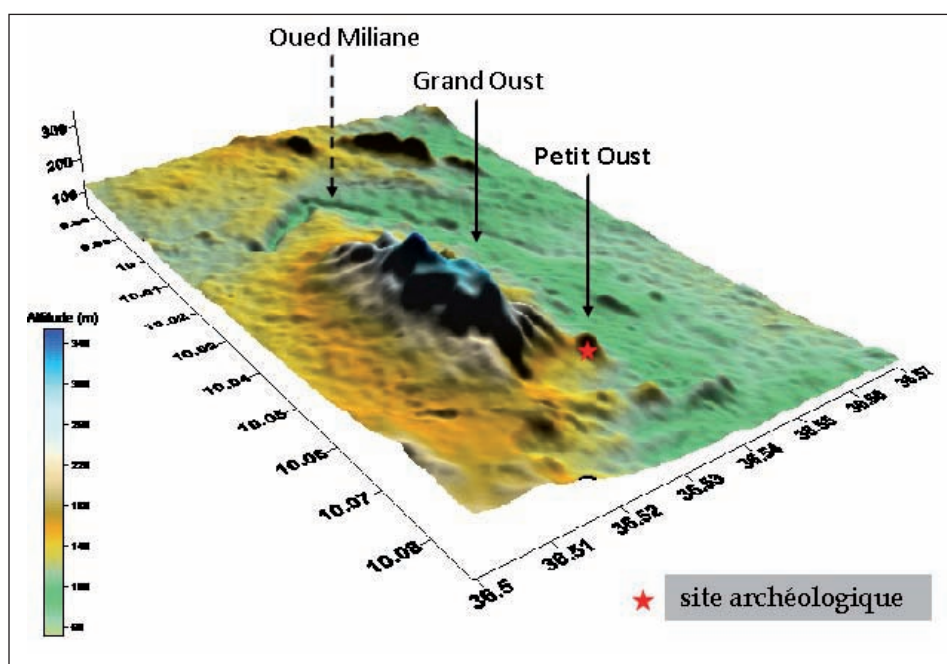


Figure B.28.
MNT de la région de Jebel Oust
et situation du site archéologique
(données SRTM).



Figure B.29.
Carrière exploitant les calcaires du versant du Jebel Oust
(en arrière-plan : le Jebel Zaghouan).

B.I.2.2. Le cadre climatique.

B.I.2.2.1. Le climat actuel.

La position géographique du site de Jebel Oust [coord. : 36°32'03"N, 10°04'14"E] lui fait bénéficier d'un climat méditerranéen, protégé par la zone montagneuse de la dorsale tunisienne du climat aride saharien. Dans cette catégorie de climat, le paramètre prépondérant qui va caractériser l'ambiance climatique global et ses grandes tendances est la quantité de pluie que va recevoir la région.

Ainsi, la pluviosité est une des composantes les plus importantes pour appréhender le climat tunisien et représente un facteur très nettement influant dans le bilan hydrique de ce pays. Pour caractériser le climat actuel

et le cadre hydrologique de la région de Jebel Oust, nous nous appuyons sur les travaux effectués par les géographes du *Groupe de Recherche sur la variabilité du climat* de l'Université de Tunis, et particulièrement sur les travaux de L. Henia (Henia, 1993) dont les recherches portent sur le climat et les bilans de l'eau en Tunisie. L'auteur utilise une masse considérable de données pluviométriques, disponibles dans les archives tunisiennes, pour étudier la variabilité des précipitations sur trente-et-une stations équipées d'un pluviomètre et dispersées dans toute la Tunisie, sur une durée de 80 ans, de 1901 à 1980.

B.I.2.2.1.1. Les facteurs de contrôle de la variabilité pluviométrique.

Plusieurs facteurs sont responsables de la variabilité spatiale et temporelle des pluies en Tunisie. Le premier d'entre eux correspond à la complexité de la circulation atmosphérique dans cette région. Par une large simplification, nous pouvons dire que la Tunisie est située dans une zone de contact climatique, entre les processus de la zone tempérée au nord et les influences des déserts tropicaux au sud. Selon les saisons, ces deux types de processus bien opposés vont intervenir l'un ou l'autre. Les facteurs géographiques vont également régir la variabilité des précipitations, de concert avec la circulation atmosphérique. Ceux-ci sont les grandes zones de reliefs qui accentuent les contrastes pluviométriques régionaux, notamment la Dorsale, zone montagneuse qui traverse le pays du centre-ouest au nord-est et qui sépare le Tell humide au nord des steppes au sud. De plus, les régions septentrionales du pays se trouvent en contact direct avec la mer Méditerranée alors que les régions méridionales subissent directement les influences sahariennes. Cet ensemble de facteurs va entraîner une grande variabilité de la pluviométrie dans le temps et dans l'espace (Henia, 1993). Pour notre étude, nous nous référons aux variations interannuelles de la pluviosité entre 1901 et 1980 pour les stations de Tunis [36°47'51"N, 10°09'57"E], situé à 30 km au nord de Jebel Oust, et Zaghouan [36°24'N, 10°09'E], situé à 20 km au sud. Pour ces deux stations, la grande variabilité des précipitations est reflétée par les grandes oscillations de la courbe représentant la variation annuelle de la pluviosité par rapport à la moyenne.

B.I.2.2.1.2. Une variabilité pluviométrique annuelle.

Les courbes d'oscillation de la pluviosité sur les deux sites de Tunis et de Zaghouan sont sensiblement identiques (Fig. B.30). De manière évidente, les précipitations sont plus importantes au niveau de la zone montagneuse de Zaghouan (moyenne de 520 mm/an) qu'à Tunis (450 mm/an). Globalement, les oscillations interannuelles observées à Tunis se retrouvent dans les données du site de Zaghouan, ainsi que certaines périodes de (très) faible pluviosité, l'exemple le plus convaincant étant la décennie de 1940 à 1950. Entre 1941 et 1948, la moyenne pluviométrique chute à 302 mm/an à Tunis et à 397 mm/an à Zaghouan. Quelques années de relative sécheresse se retrouvent dans les deux courbes des totaux pluviométriques annuelles : c'est le cas de l'année 1914 (250 mm et 280 mm pour Tunis et Zaghouan, respectivement), de l'année 1927 (220 mm et 270 mm) et de l'année 1961 (250 mm et 320 mm). Parallèlement à ces années de faible pluviosité, Les deux grands pics des années 1954 (760 mm pour Tunis, 970 mm pour Zaghouan) et 1959 (810 mm pour Tunis, 920 mm pour Zaghouan), correspondant à deux années de pluies relativement importantes, se retrouvent également sur les deux graphiques, ainsi, que, dans une moindre mesure, le pic de l'année 1956 (660 mm et 820 mm).

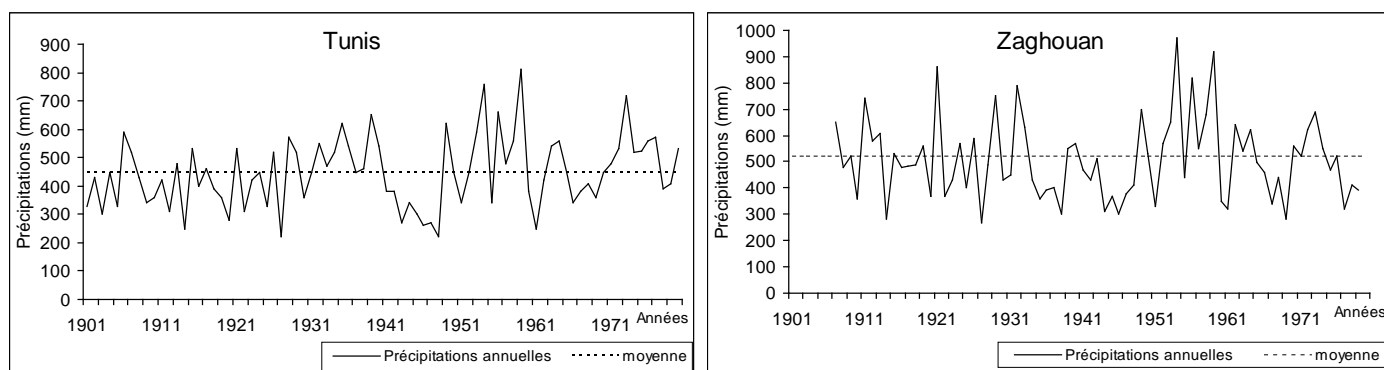


Figure B.30. Variabilité pluviométrique annuelle par rapport à la moyenne à Tunis et Zaghouan, de 1901 à 1980 (d'après Hénia, 1993).

B.I.2.2.1.3. Une variabilité pluviométrique saisonnière.

A la suite de la mise en évidence de similitudes dans les variations interannuelles de la pluviosité entre les régions de Tunis et de Zaghouan, nous pouvons détailler la variabilité des précipitations à l'échelle annuelle. Pour cela, nous utilisons les totaux pluviométriques mensuels relevés sur 80 années pour la région de Tunis, de 1901 à 1980. La répartition mensuelle des pluies apparaît très largement irrégulière (Fig. B.31a). En effet, si de septembre à mai, les précipitations peuvent être relativement importantes, elles sont nettement plus faibles de juin à août. Ce phénomène se perçoit parfaitement lorsque l'on considère les totaux des maxima pluviométriques, qui atteignent près de 250 mm pour les mois de décembre et janvier, et qui chutent jusqu'à 20 mm en juillet ; notons que cette dissymétrie est moins accusée pour les totaux des minima pluviométriques mais est tout de même présente.

Plus généralement, ce contraste quantitatif se retrouve également dans les totaux pluviométriques saisonniers (Fig. B.31b). Ces derniers font apparaître une nette dissymétrie entre l'automne, l'hiver et le printemps, saisons pendant lesquelles les précipitations sont relativement importantes, et l'été, saison extrêmement sèche.

L'analyse des totaux mensuels et saisonniers pour la région de Tunis montre ainsi le net contraste saisonnier qui peut exister dans la répartition des pluies à l'échelle annuelle.

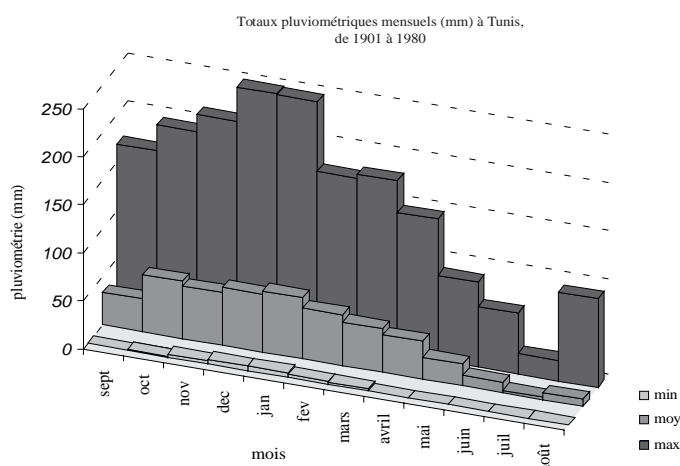


Figure B.31a. Totaux pluviométriques mensuels à Tunis, (d'après Hénia, 1993).

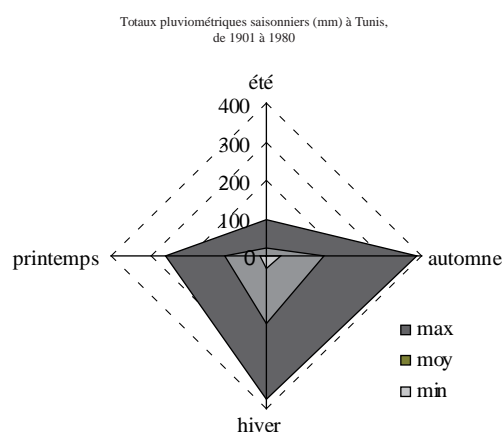


Figure B.31b. Totaux pluviométriques saisonniers à Tunis (d'après Hénia, 1993).

B.I.2.2.2. Les conditions environnementales en Afrique du Nord à l'époque antique.

« *Quando in Africam venit, ad adventum eius post quinquennium pluit, atque ideo ab Africanis dilectus est* »¹

De vita Hadriani (II^e s. apr. J.-C.)

La question des conditions environnementales en Afrique du Nord à l'époque romaine a toujours fait l'objet d'un consensus depuis un siècle auprès des différents spécialistes : le climat du nord de l'Afrique à l'époque romaine n'était pas fondamentalement différent de l'actuel mais devait être cependant sensiblement plus humide. Cette question fut d'abord abordée par des historiens, dont les travaux vont aboutir à un certain modèle du climat antique en Afrique du Nord, avant d'être étayée par des études pluridisciplinaires issues du domaine des géosciences de l'environnement.

B.I.2.2.2.1. Le modèle proposé par les historiens.

Le précurseur des études des conditions environnementales en Afrique du Nord à l'époque romaine fut l'historien Stéphane Gsell, qui formula l'idée d'un climat identique mais sensiblement plus humide dans un premier article consacré au climat de l'Afrique du Nord dans l'Antiquité (Gsell, 1911) avant de reprendre cette même idée dans sa monumentale *Histoire Ancienne de l'Afrique du Nord* (Gsell, 1913). Dans ses travaux, S. Gsell entreprend, entre autre, un essai de réponse quant à la prospérité agricole que connaît l'Afrique septentrionale durant une grande partie de l'époque antique et introduit judicieusement ses propos en posant une question essentielle à l'appréhension des conditions environnementales dans l'Afrique du Nord antique : il s'agissait de savoir « si [la] prospérité [de l'Afrique romaine] a eu pour cause principale un climat plus favorable à la culture que le climat d'aujourd'hui ou si elle a été surtout l'œuvre de l'intelligence et de l'énergie des hommes ; si nous devons nous borner à regretter un passé qui ne revivra plus ou lui demander au contraire des leçons utiles au temps présent » (Gsell, 1913, p. 40).

Ciblant la période antique, S. Gsell établit une description région par région des différents paramètres caractérisant les conditions climatiques du milieu, s'appuyant sur des sources écrites (des inscriptions archéologiques aux écrits des auteurs antiques), sur des données archéologiques d'occupation du sol, et sur les structures hydrauliques, vestiges des travaux ingénieux des anciens.

S'appuyant sur l'abaissement, voire l'assèchement, d'un certain nombre de points d'eau, qui assuraient la présence d'une faune résiduelle d'éléphants (qui sembleraient être des descendants de l'*elephas africanus*), ou de puits antiques, S. Gsell produit quelques arguments pour soutenir que le climat était légèrement plus humide qu'actuellement, en particulier à proximité des zones montagneuses. Cependant, ces variations restent locales et n'ont pratiquement jamais trouvé de véritables preuves archéologiques ; elles peuvent bien évidemment être dues à des facteurs n'ayant aucun rapport avec des variations climatiques, tels que des tremblements de

¹ « Quand il se rendit en Afrique, la pluie tomba à son arrivée après cinq années de sécheresse, ce qui lui valut l'affection des Africains » (*Histoire Auguste, Vie d'Hadrien*, XXII, 14).

terre, que nous savons fréquents en Afrique du Nord et qui peuvent être à l'origine de l'assèchement d'un point d'eau, ou au rôle grandissant des influences humaines entraînant la surexploitation des ressources naturelles du milieu, et particulièrement des ressources hydriques.

Trois quarts de siècle après les études de S. Gsell, l'historien Brent D. Shaw consacra un certain nombre de ses recherches sur le climat à l'époque romaine en Afrique du Nord. Plusieurs de ses articles furent regroupés dans une publication commune intitulée *Environment and Society in Roman North Africa* (Shaw, 1995), dont deux d'entre eux sont consacrés au climat, l'un sur l'époque préhistorique saharienne, le second sur l'époque romaine. A la lumière d'études nouvelles, et en s'appuyant particulièrement sur les travaux novateurs du géomorphologue Claudio Vita Finzi qui pu mettre en évidence le rôle majeur du climat dans la crise érosive et la métamorphose fluviale au cours des périodes historiques (Vita Finzi, 1969), B.D Shaw dresse une évaluation de la contrainte climatique qui va lui être nécessaire pour aborder deux sujets à problématique écologique et environnementale : l'introduction tardive du dromadaire (*Camelus dromedarius*) dans le nord de l'Afrique attribuée historiquement aux Romains (Shaw, 1995, IV, p. 663-721) et l'influence relative de l'innovation romaine dans les aménagements hydrauliques dans le Maghreb antique (Shaw, 1995, V, p. 121-173). Il saisit ainsi l'occasion pour croiser une typologie des aménagements hydrauliques romains avec l'inventaire des ressources en eau disponibles, de la pluviosité aux eaux superficielles et souterraines (Shaw, 1995, VII, p. 73-74) (Fig. B.32). Par ce biais, il démontre bien le risque climatique auquel étaient exposées les sociétés antiques en Afrique du Nord, au croisement de la vulnérabilité, définit par les stratégies et les méthodes d'approvisionnement en eau, et de l'aléa naturel qui régie les ressources hydriques (Leveau, 2009, p. 314). En parallèle, B.D. Shaw n'omet pas de rappeler le rôle et l'impact de l'occupation du sol sur le bilan sédimentaire, en soulignant l'obstacle à l'érosion engendré par les modes d'occupation du sol et, à l'inverse, la pleine expression de l'érosion climatique lors des périodes d'abandon du sol (Shaw, 1995, III, p. 395).

Type de source	Utilisations principales des ressources hydriques			
	Champs extensifs	Horticulture intensive	Usage quotidien	Fontaines, Nymphées, Bains
Précipitations	Citernes, réservoirs et autres systèmes de stockage de l'eau			
Nappes souterraines	Puits / mécanismes de puisage			
Sources	Petits aqueducs et canaux			Aqueducs monumentaux
Eaux stables de surface		dispositifs de levage mécanique		
Eaux mobiles de surface				
Eaux erratiques de surface	Terrasses et barrages artificiels			

Figure B.32. Inventaire des ressources en eau disponibles et typologie des aménagements hydrauliques romains (d'après Shaw, 1995).

B.I.2.2.2.2. L'apport des géosciences de l'environnement.

L'apport des géosciences de l'environnement, dont en particulier la géomorphologie, la géoarchéologie fluviale, la pédologie et la paléoécologie, ne va pas bouleverser ses premières théories, mais va permettre la compréhension des procédés (Leveau, 2009, p. 310). Les travaux précurseurs du naturaliste Hubert H. Lamb

(Lamb, 1977, *in* Leveau, 2009), qui confirment les premières conclusions du modèle offert par les historiens, font encore autorité auprès des spécialistes des sciences de la Terre et de l'environnement. Dans une étude géoarchéologique menée sur le bassin de l'oued Miliane, qui prend sa source sur le versant occidental de la Dorsale et se jette dans le golfe de Tunis, Bourguou et Oueslati (1987) expliquent une phase de remblaiement à l'origine des dépôts constituant une terrasse fluviale d'âge historique par la présence d'une période humide ou pluvieuse, en complément des activités agricoles (l'origine de cette phase de remblaiement serait donc partiellement climatique), depuis l'époque punique jusqu'à la fin de l'époque romaine. Ces dépôts correspondraient au « Younger Fills » défini par Vita-Finzi (1969), un des pères de la géoarchéologie moderne, qui a pu mettre en évidence cette phase humide récente, qualifiée d'« historique » car débutant à l'époque romaine, de remblaiements des vallées sédimentaires de Tripolitaine et Cyrénaïque ainsi que de pays méditerranéens. Cette phase précède une phase d'incision qui débute au VII^e s., avant la formation de la terrasse historique inférieure qui paraît être liée à un mini-épisode pluvieux correspondant au Petit-Age Glaciaire de l'Europe occidentale (Bourguou et Oueslati, 1987).

Cette vision générale fut par la suite affinée, grâce aux études menées sur la vallée moyenne de la Medjerda (Faust *et al.*, 2004), importante rivière prenant sa source en Algérie et qui se jette dans le golfe de Tunis, après avoir traversé l'une des secteurs géographiques les plus riches, d'un point de vue agricole, de l'Afrique romaine. Ces travaux ont permis de préciser la dynamique fluviale de la Medjerda à l'Holocène et de mettre en évidence une longue pause de stabilité géomorphologique durant la période antique (Fig. B.33), au cours de laquelle un sol a pu se former (des conditions plus humides ont pu entraîner une pédogenèse). Cette période est centrée sur les I^{er} et II^e siècles de notre ère et débute au V^e s. av. J.-C., avant une reprise de l'activité fluviale à partir du III^e siècle. Trois autres épisodes de stabilité géomorphologique et de pédogenèse ont pu être mis en évidence, aux VI^e s., XII^e / XIII^e s. et au XVI^e s., chacun séparé par une phase d'aridification. Concernant la phase de stabilité géomorphologique à l'époque romaine, les auteurs penchent pour une explication anthropique du phénomène par le biais des pratiques agricoles mises en oeuvre par les Romains en Afrique du Nord (irrigation, terrassement, techniques de rétention de l'eau, etc.), qu'ils disent parfaitement ajustées aux conditions environnementales (Faust *et al.*, 2004, p. 1771).

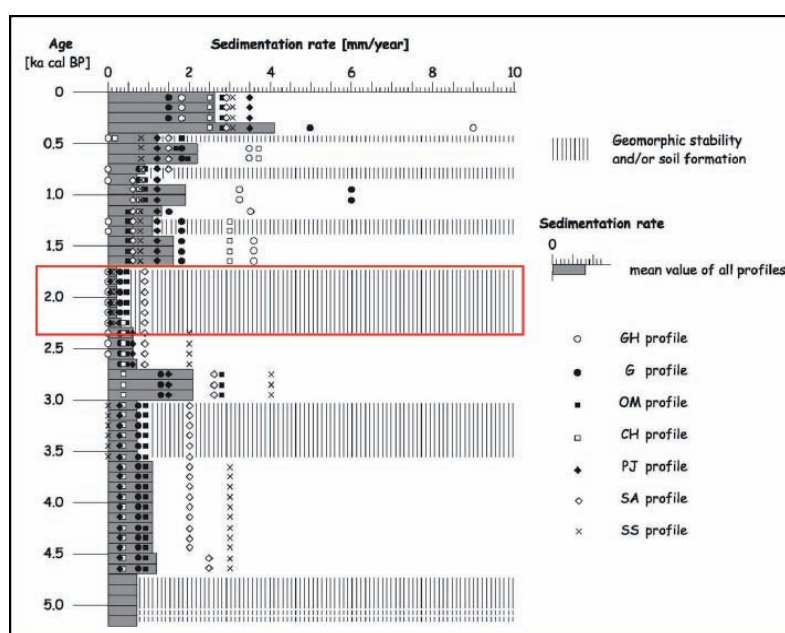


Figure B.33.
Reconstitution du taux de sédimentation
de la Medjerda (Faust *et al.*, 2004) ;
en encadré, la phase de stabilité de la
période antique.

Les études palynologiques menées sur des carottes sédimentaires provenant du golfe de Gabès et du plateau des Kerkennah a pu retracer les modifications de l'environnement végétal en Tunisie depuis 20 000 ans (Brun, 1992) et confirmer les résultats issus de études géoarchéologiques et géomorphologiques. En outre, ces travaux paléoécologiques ont permis la mise en évidence de plusieurs événements botaniques au cours de la période historique, qui peuvent être liés à des signaux anthropiques et/ou climatiques : *i*) une forte extension d'*Artemisia* (Armoise) corrélée à une régression de *Quercus* à feuillage caduc et la prééminence de l'olivier (*Olea*) sur les pistachiers (*Pistacia*) entre la fin de l'époque romaine et le X^e siècle, *ii*) la suprématie de l'olivier (*Olea*) au cours des derniers siècles de notre ère. Le développement de l'olivier est clairement à mettre en relation avec l'intensification de l'oléiculture dans le centre tunisien, qui se manifeste déjà à l'époque romaine dans le Nord-Est de la Tunisie. Par contre, l'origine du processus de steppisation (marqué par l'accroissement d'*Artemisia*) à la fin de l'époque romaine est plus délicate à interpréter (aridification liée à une dégradation anthropique et/ou d'origine climatique).

Synthèse sur les conditions environnementales en Afrique du Nord à l'époque romaine.

Les différents et nombreux travaux de recherche concernant les conditions environnementales en Afrique du Nord à l'époque antique aboutissent à la construction d'un « modèle romain » sensiblement identique au modèle climatique et environnemental actuel. Comme le résume Ph. Leveau dans un bilan des recherches sur les conditions climatiques dans l'Afrique du Nord antique (Leveau, 2009), il existait un climat favorable, car légèrement plus humide, durant la période qui s'étend du V^e s. av. JC au III^e s. apr. J.-C., située entre deux périodes pendant lesquelles le climat était plus sec. L'aridification de la situation à la fin de la période antique peut s'expliquer par une oscillation du climat ; à l'heure actuelle, cette modification du climat ne peut être mise en relation avec l'impact des sociétés (Leveau, 2009, p. 341), car il est nécessaire de rester prudent face aux données actuelles, qui restent rares et qui sont difficilement généralisables à l'ensemble des secteurs géographiques de la Tunisie.

B.I.3. Le système géothermal régional de Jebel Oust.

B.I.3.1. Le modèle géothermal.

B.I.3.1.1. Un système d'émergence par diaclases.

Les eaux thermales de Jebel Oust, comme la plupart des eaux chaudes de Tunisie, ont une origine dite vadose*. Dans le cas des eaux thermales de Jebel Oust, le système géothermal présente un mode de fonctionnement relativement simple (fig. B.34), qu'il est indispensable de connaître pour appréhender le comportement hydrologique de la source chaude. Les eaux de pluie (les précipitations) s'infiltrant dans le substrat calcaire fissuré du massif montagneux de Zaghouan (1295 m). Une partie de cette eau ressort directement sur les versants du Jebel Zaghouan, donnant naissance à un certain nombre de sources froides, dont celle du célèbre Temple des

Eaux, construit sous le règne d'Hadrien et point de départ du grand aqueduc de Carthage. Une autre partie des eaux de pluie s'infiltré en profondeur puis circule dans les couches géologiques profondes où ces eaux se réchauffent suivant le gradient géothermique terrestre et s'enrichissent en minéraux dissous, avant de remonter brusquement au niveau du Jebel Oust (396 m), massif intensément faillé.

La définition de ce modèle hydrogéologique rend ainsi compte d'un système géothermal fonctionnant par pression schématisé par la présence d'une branche descendante et froide au niveau du Jebel Zaghouan, qui appuie directement sur une branche ascendante et chaude qui émerge sur le versant du Jebel Oust. Les conséquences d'un tel fonctionnement sont importantes puisqu'elles se répercutent directement sur les variations de débit de la source chaude. En effet, lors des périodes humides, les fortes précipitations entraînent un poids plus important de la branche descendante sur la branche ascendante, engendrant un débit plus fort à l'émergence, alors qu'à l'inverse, lors des périodes sèches, la pression de la branche descendante sur la branche ascendante est moindre, en conséquence le débit de la source chaude également. Ce phénomène sera à l'origine des variations saisonnières du débit de la source chaude, en relation directe avec les variations saisonnières pluviométriques qui caractérisent la région.

Nous verrons dans un chapitre ultérieur les aménagements anthropiques actuels et leurs pendants antiques, qui ont été mis en œuvre pour faire face à ces variations de débit de la source chaude de Jebel Oust. En attendant, concentrons-nous sur les paramètres physico-chimiques qui permettent de caractériser cette source thermale de Jebel Oust et de replacer celle-ci au sein du contexte environnemental et hydrogéologique régional.

B.I.3.1.2. Caractérisation physique et géochimique des eaux de la région de Jebel Oust.

B.I.3.1.2.1. Caractérisation physico-chimique de l'eau thermale de Jebel Oust.

B.I.3.1.2.1.1. Caractérisation physique.

Les principaux paramètres physiques qui caractérisent une eau thermale sont le débit de l'eau lors de son émergence et sa température. Plusieurs valeurs de ces deux paramètres seront trouver au sein de bilans scientifiques publiés ou mesurer directement lors des campagnes de terrain et permettront de caractériser la source thermale de Jebel oust au sein d'une classification définie.

• Le débit et la température :

Le débit, qui exprime le volume d'eau fourni par la source par unité de temps, va être fonction de plusieurs paramètres. Dans le cas du système géothermal de Jebel Oust, il est largement dépendant des conditions pluviométriques de la région comme la modélisation du système géothermal régional le montre. Les précipitations alimentent la branche descendante (et froide) du système, qui elle-même agit par simple pression sur la branche ascendante (et chaude) à l'origine de l'émergence. Ainsi, le débit de la source est directement lié

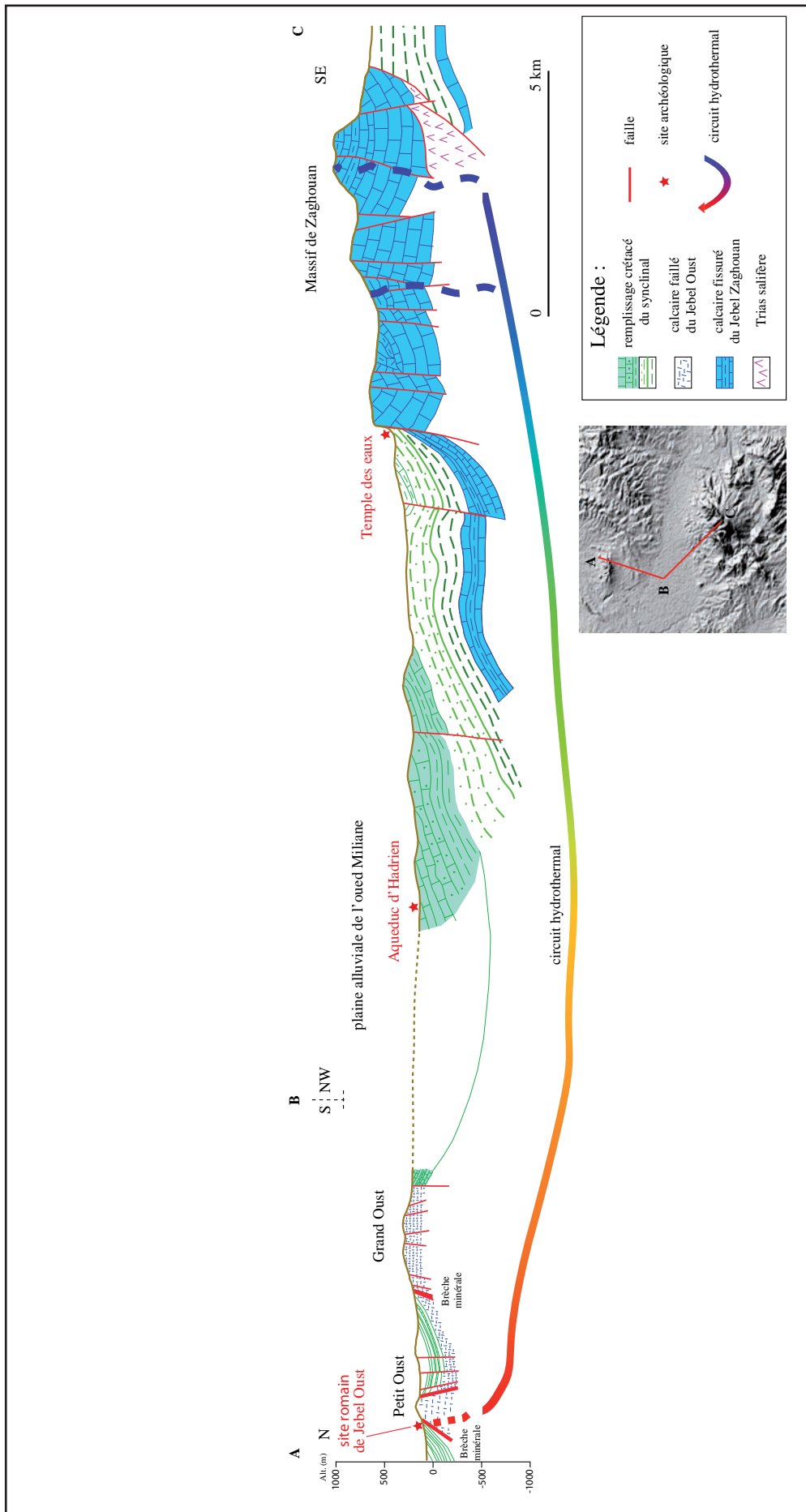


Figure B.34. Coupe géologique Jebel Oust-Zaghouan (trait de coupe restitué sur le MNT) et modèle de fonctionnement du système hydrothermal régional.

aux régimes de précipitations dans la région. Plus les précipitations sont importantes (saison humide), plus la pression sur la branche ascendante est forte, et plus le débit de la source est élevée. A l'inverse, plus les précipitations diminuent, entraînant une pression plus faible sur la branche ascendante, et plus le débit diminue.

La température d'une eau thermale est liée à son origine, à la profondeur atteinte par les eaux lors de son circuit thermal (circulation dans les couches profondes) et à la vitesse de remontée de ces eaux (p. ex. une remontée rapide par diaclases dans le cas du système thermal de Jebel Oust). Les eaux thermales, lors de leur remontée vers la surface, se réchauffent suivant le gradient géothermique interne (transfert de chaleur de la profondeur vers la surface), qui est en moyenne de 3 °C par 100 mètres. Un second paramètre qui va jouer sur la température de l'eau thermale est son mélange éventuel avec les eaux de surface, provenant d'aquifères peu profonds et plus froides, avant son émergence. Ce dernier paramètre est à mettre en relation avec les variations de débit de la source, reliées directement aux variations pluviométriques.

Nous pouvons classer les eaux thermales en trois catégories selon leur température :

- Les eaux hypothermales, dont la température est inférieure à 30 °C.
- Les eaux mésothermales (terme simplifié en « eaux thermales »), dont la température est comprise entre 30 et 50 °C.
- Les eaux hyperthermales, dont la température est supérieure à 50 °C.

Les premières analyses de l'eau thermale de Jebel Oust, effectuées par le *Laboratoire du Service des Mines* (Berthon, 1914), rendent compte d'une température de 55 °C et d'un débit approximatif évalué à 600 ou 700 m³ par jour (c.-à-d. 6,95 ou 8,10 L/s).

En 1995, suite à deux ans de sécheresse rendant le débit insuffisant pour les besoins du centre thermal de Jebel Oust, un essai de pompage fut réalisé à la demande de l'office du thermalisme de Tunisie avec l'aide de la Direction Générale des Ressources en Eau (DRGE) (Sadki, 1998). La source thermale ne produisait alors que **2,57 L/s** suite à ces deux années de sécheresse, et un essai de pompage fut alors décidé afin de prévenir le risque d'assèchement de cette source. Après trois heures de pompage avec un débit de **16,7 L/s**, la température de l'eau est passée de 52 à 56 °C pour se maintenir à cette température jusqu'à la fin du pompage (48h), avec un pH de 6,22 et une teneur en bicarbonates de 562 mg/L. Suite à cette étude, la transmissivité des calcaires de l'aquifère est estimée entre 47.10⁻³ et 38.10⁻³ m²/s, ce qui indique une bonne perméabilité de la roche réservoir (Sadki, 1998). Le rabattement total atteint lors des 48 h de pompage fut de 19 cm, sans jamais avoir atteint une stabilisation parfaite. Les conclusions de cette enquête assurent que l'avenir du complexe thermal de Jebel Oust n'est à priori pas menacé, puisqu'il peut disposer d'un débit minimum d'exploitation de 10 L/s.

Le débit de la source thermique varie en moyenne, sans pompage, de 2 à 15 L/s, en fonction du régime pluviométrique de la région. La source de Jebel Oust est une source hyperthermale, avec une température moyenne à l'émergence de 55 °C. Cette température est susceptible de varier de quelques degrés en fonction du débit de la source. Pendant les périodes de faible débit, la température de l'eau lors de son émergence est plus faible car l'eau thermique est d'avantage refroidie par les eaux de surface lors de sa remontée. A l'inverse, les périodes de fort débit connaissent des températures plus élevées car l'eau thermique est moins susceptible d'être « polluée » par les eaux froides de surface. Les valeurs de température de la source thermique de Jebel Oust à son émergence, mesurées au cours des différentes missions sur le terrain, s'inscrivent dans une gamme variant de 54,9¹ à 57,3² °C.

B.I.3.1.2.1.2. Caractérisation chimique.

• La composition chimique :

Lors de leur circulation dans les couches géologiques profondes, les eaux d'un système thermal vont dissoudre et lessiver les principaux minéraux mobilisés qui vont caractériser la composition chimique de l'eau lors de son émergence à la surface terrestre. La minéralisation d'une eau thermique va donc être dépendante de la nature des roches rencontrées lors des circulations souterraines, la nature des roches du réservoir, ainsi que de la température, de la pression et de la vitesse de circulation de l'eau dans ces couches réservoir. L'analyse chimique des eaux va permettre de déterminer la concentration des éléments chimiques présents dans l'eau.

Les résultats (Tab. 2, d'après Sadki, 1998 ; Teib Helali, 1999) d'analyse des éléments majeurs et traces présents dans l'eau thermique de Jebel Oust montrent une large prédominance des ions Na⁺ et Cl⁻ (4680,5 et 7593,45 mg/l, respectivement). Ces fortes teneurs en Na⁺ et Cl⁻ proviennent très vraisemblablement du lessivage de formations salifères au cours du trajet souterrain de l'eau, correspondant très certainement aux couches salifères datées du Trias, et vont être responsable de la saveur salée de l'eau de Jebel Oust. La forte abondance en ion calcium Ca²⁺ (2004 mg/l) s'explique par le lessivage des séries carbonatées du Jurassique par l'eau à la faveur d'un excès d'acide carbonique lors son trajet en profondeur. Le magnésium, souvent associé au calcium dans les eaux naturelles, présent dans l'eau de Jebel Oust (Mg : 463,2 mg/l) provient essentiellement de la dissolution des dolomies, des calcaires et des marnes dolomitiques.

La présence des éléments traces tels que le lithium (Li), le strontium (Sr) et le fluor (F), en quantité non-négligeable (1,13 , 16,1 et 2,47 mg/l, respectivement), s'explique par le lessivage des séries jurassiques et/ou triasiques.

¹ Valeur minimale, mesurée en juin 2007.

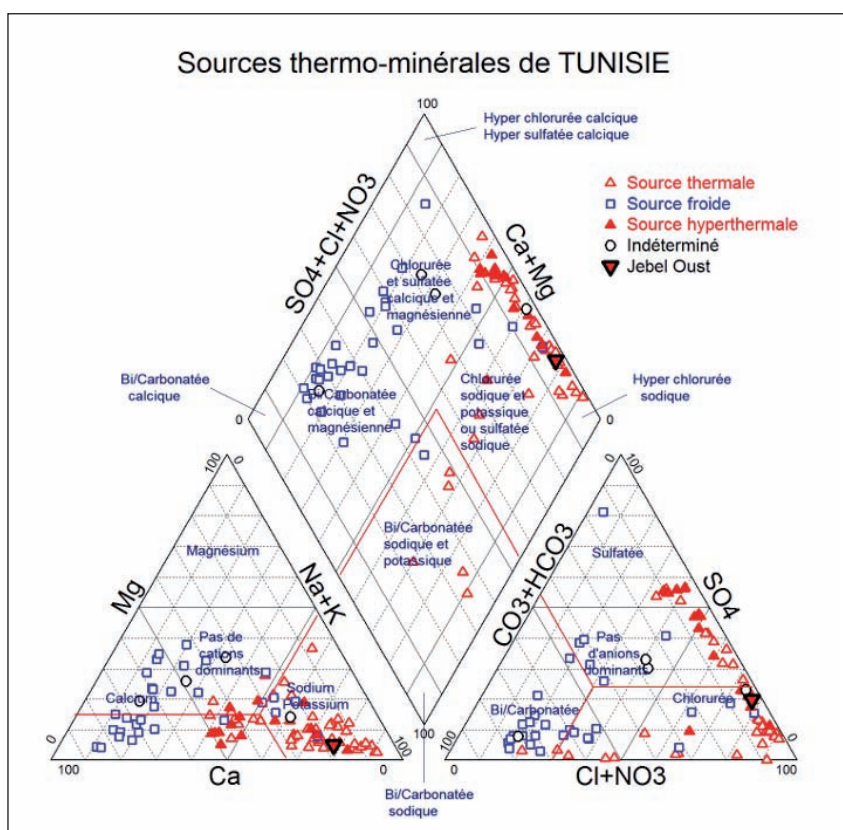
² Valeur maximale, mesurée en juin 2007.

Eléments majeurs (mg/l) (Sadki, 1998)							
Na	K	Ca	Mg	Cl	HCO ₃	SO ₄	
4680,5	175,11	2004	463,2	7593,45	524,6	5617,92	
Eléments traces (mg/l) (Teib Helali, 1999)							
Li	Sr	F	SiO ₂	NH ₄	NO ₃	NO ₂	H ₃ PO ₄
1,13	16,1	2,47	31	0	0,02	0,01	0,05
T (°C)	pH	Salinité					
53	5,69	17,02					

Tableau 2. Composition élémentaire de l'eau thermique de Jebel Oust.

La représentation des teneurs en éléments majeurs (cations et anions) dans un diagramme de Piper¹ (Fig. B.35) permet de restituer la source thermique de Jebel Oust au sein de l'ensemble des manifestations thermo-minérales de la Tunisie. Les compositions chimiques en éléments majeurs de 97 sources thermo-minérales ont été analysées (données de l'office du thermalisme²). Plusieurs faciès chimiques particuliers sont différenciables parmi l'ensemble de ces sources thermo-minérales tunisiennes. Un premier groupe de sources froides présente un faciès bicarbonaté calcique et magnésien, alors qu'un nombre plus faible de sources froides possède un faciès chloruré et sulfaté, calcique et magnésien. Concernant les sources thermales (30 < T °C < 50) et hyperthermales (T > 50 °C), elles se séparent en deux faciès chimiques différents : l'un chloruré et sulfaté, calcique et magnésien, le second **chloruré sodique et potassé**. C'est au sein de ce dernier groupe que se situe la **source hyperthermale de Jebel Oust**.

Figure B.35. Classification des sources thermo-minérales de Tunisie dans un diagramme de Piper.



¹Le diagramme de Piper utilise les éléments majeurs pour représenter les différents faciès des eaux souterraines. Il est composé de deux triangles représentant les cations et les anions et d'un losange synthétisant l'ensemble. Le tableau de données qui a permis d'établir le diagramme de Piper présenté ici est donné dans les annexes du manuscrit (cf. Annexe E).

²Le portail internet de l'office du thermalisme : www.thermalisme.nat.tn

• La conductivité :

La conductivité d'une eau thermique est liée à la présence dans cette eau de sels dissous, offrant ainsi une résistance plus ou moins importante au passage d'un courant électrique. La conductivité est fonction de la température de l'eau, de la concentration, de la nature et de l'état d'ionisation des composés dissous. La conductivité de l'eau thermique de Jebel Oust, mesurée à 20 °C, présente une valeur de 20,94 mS.cm⁻¹ (Teib Helali, 1999). Cette conductivité relativement élevée traduit une forte charge saline dont la valeur, que nous avons pu mesurer sur le terrain, est de 15,9 g/L.

• La radioactivité :

La radioactivité des eaux thermales provient essentiellement des principaux émetteurs naturels rencontrés lors des circulations du fluide dans l'écorce terrestre (p. ex. uranium et thorium). Les sources thermales sont presque toutes radioactives, dans des proportions variables, conséquence de la large diffusion des composés radioactifs mobilisables dans la lithosphère. Dans le cas de Jebel Oust, une étude a pu démontrer la présence de radon¹ (²²²Rn) en grande quantité dans l'eau thermique et dans l'atmosphère de la galerie de captage et a pu évaluer les risques potentiels d'exposition du personnel technique du complexe thermal (Labidi *et al.*, 2006).

Les eaux thermales de Jebel Oust sont classées parmi les eaux hyperthermales chlorurées sodiques, avec une température moyenne de 55 °C. Ces eaux sont claires, limpides, sans odeur, et à saveur fortement salée.

B.I.3.1.2.3. Géochimie des isotopes stables des eaux de la région.

Les isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène :

Les teneurs en isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène peuvent être utilisées comme traceurs de l'origine de l'eau et comme indicateurs de certains processus, comme l'évaporation et le mélange d'eaux, qui peuvent avoir lieu à des niveaux superficiels ou peu profonds.

Les mesures isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène des eaux sont données par rapport à un standard international, représentatif de la composition isotopique moyenne des eaux océaniques, le **SMOW** (*Standard Mean Ocean Water*). Par définition, $\delta_{\text{SMOW}} = 0$.

Six eaux de nature et/ou de localisation géographique différentes ont été prélevées et analysées dans la région du site de Jebel Oust et ses environs² (Annexe) :

¹Le Radon est un gaz rare, radioactif, d'origine naturelle, issu de la désintégration du Radium.

²La température de chaque échantillon a été mesurée sur le terrain à l'aide d'une sonde multiparamétrique ; les analyses isotopiques ont été réalisées au laboratoire de géologie de l'Université Jean Monnet à Saint-Etienne (cf. A.IV).

- Deux eaux de nature **thermale** : Jebel Oust et Hammam Zriba.
- Trois sources d'**eau douce** : Jebel Oust, Zaghouan et Oudna.
- L'**eau de pluie** : Jebel Oust.

L'eau thermale de Jebel Oust a fait l'objet de deux prélèvements (échantillons JO-07-05 et JO-08-e1) provenant directement de la grotte hydrothermale actuelle et de la galerie d'accès (galerie « Gérini »). L'échantillon JO-07-05, prélevé dans la vasque hydrothermale, à une température de 54,9 °C, présente des valeurs en $\delta^{18}\text{O}$ et δD de -6,84 ‰ VSMOW et -34,55 ‰ VSMOW, respectivement. Le second échantillon, provenant de la galerie d'accès à la source, environ 100 m en aval de l'évent thermal, à une température de 57,3 °C, présentent des valeurs en $\delta^{18}\text{O}$ et δD de -5,95 ‰ et -37,75 ‰, respectivement.

L'eau thermale de Hammam Zriba, village thermal situé sur le versant sud du Jebel Zaghouan, a fait l'objet de deux prélèvements (JO-07-02 et JO-07-03), à deux températures différentes : 45,3 et 44,6 °C. Les deux échantillons présentent des valeurs en $\delta^{18}\text{O}$ identiques (-6,45 ‰) alors que les valeurs en δD sont légèrement différentes (-36,32 ‰ et -29,92 ‰).

Les eaux douces, superficielles (provenant d'aquifères peu profonds), de la région ont été prélevées à trois endroits : une source captée à Jebel Oust (JO-07-01), une source captée à proximité du site antique d'Oudna (JO-07-06) et enfin, pour les eaux du massif montagneux de Zaghouan, l'eau d'une source alimentant une fontaine moderne de la ville implantée au pied de la montagne (JO-07-08) et l'eau de l'aqueduc fournissant l'eau à Tunis (JO-07-07). L'eau douce à Jebel Oust émerge à une température de 20,4 °C et montre des valeurs isotopiques de -7,29 ‰ pour le $\delta^{18}\text{O}$ et de -40,04 ‰ pour le δD . L'eau de la source d'Oudna, d'une température de 24,7 °C, a des valeurs isotopiques de -7,40 ‰ pour le $\delta^{18}\text{O}$ et de -45,48 ‰ pour le δD . Les eaux de Zaghouan, d'une température de 22 et 20,3 °C, présentent respectivement des valeurs en $\delta^{18}\text{O}$ de -7,61 ‰ et -7,17 ‰ et des valeurs en δD de -37,24 ‰ et -37,21 ‰.

Enfin, l'eau de pluie de la région a fait l'objet d'un prélèvement, sur le site même de Jebel Oust (JO-07-01). La température mesurée de cette eau est de 17,8 °C et les valeurs isotopiques sont de -4,19 ‰ pour le $\delta^{18}\text{O}$ et de -17,96 ‰ pour le δD .

Les valeurs isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène des eaux de la région du site de Jebel Oust (eaux thermales et eaux superficielles) présentent une très bonne corrélation entre elles (coefficient de corrélation : $r = 0,92$). Reportées au sein d'un diagramme cartésien $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ (Fig. B.36), ces valeurs se situent dans une zone comprise entre la droite des eaux météoriques mondiale (**GMWL** = *Global Meteoric Water Line*) dont l'équation $\delta\text{D} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10$ a été établie par Craig (1961b) et la droite des eaux météoriques de Méditerranée occidentale (**MMWL** = *Mediterranean Meteoric Water Line*), d'équation $\delta\text{D} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 22$ (Sadki, 1998).

De plus, l'ensemble des valeurs se situent au voisinage immédiat de la droite météorique locale à Tunis

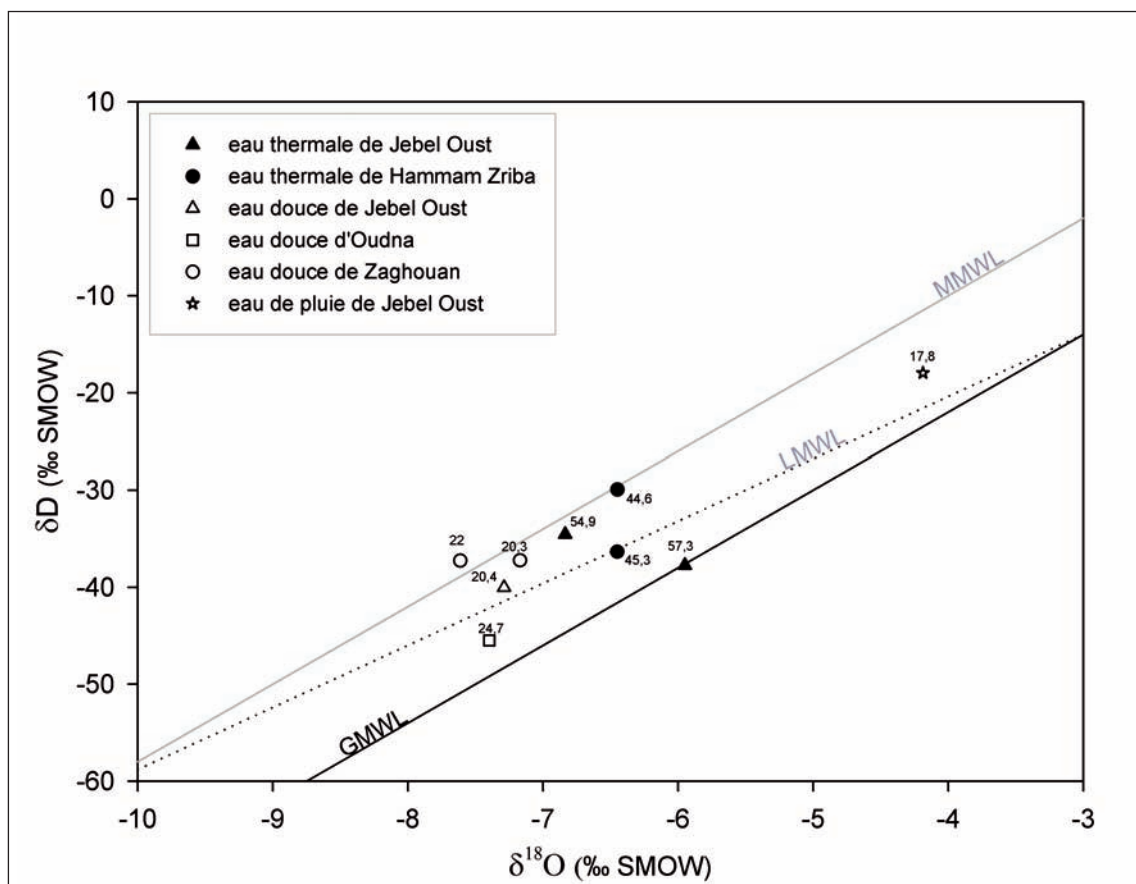


Figure B.36. Diagramme $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ des eaux de la région de Jebel Oust (et températures associées en $^{\circ}\text{C}$) ; GMWL = Global Mean Water Line (Craig, 1961), LMWL = Local Mean Water Line (Celle-Jeanton et al., 2001), MMWL = Mediterranean Mean Water Line (Sadki, 1998).

(LMWL = Local Meteoric Water Line), d'équation $\delta\text{D} = 6,4 * \delta^{18}\text{O} + 5,2$ (Celle-Jeanton et al., 2001) déterminée à partir des données produites par l'IAEA (International Atomic Energy Agency) au sein du programme GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation)¹.

Ceci permet de confirmer l'hypothèse d'une origine météorique des eaux thermales de Jebel Oust. L'information la plus remarquable lorsque l'on regarde la composition isotopique des échantillons collectés sur le terrain est l'absence de l'effet de l'évaporation sur la composition isotopique. Ceci traduit une recharge rapide en eau du réservoir et que l'eau météorique, qui alimente ce réservoir, s'infiltre rapidement dans l'aquifère thermal, avec un faible temps de transit dans le sol. Ceci s'explique par la faible importance des sols qui sont largement érodés dans la région de Jebel Oust, et le caractère très perméable et fissuré du substrat géologique.

¹Le GNIP est un programme de suivi de mesures des teneurs en isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène des précipitations dirigé par l'IAEA (International Atomic Energy Agency) dans plusieurs régions du monde. Le portail internet du GNIP, ainsi que la base de données associée, sont disponibles à l'adresse : http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_gnip.html.

La signature géochimique des eaux thermales de Jebel Oust permet de tirer les conclusions suivantes :

- **Les eaux thermales de Jebel Oust sont d'origine météorique. Les eaux de pluie s'infiltrant dans les niveaux perméables du Jebel Zaghouan qui constitue la zone de recharge du système.**
- **Les eaux thermales s'enrichissent en minéraux dissous par lessivage des terrains traversés lors de leur circulation souterraine profonde, et acquièrent ainsi leur faciès chloruré-sodique et carbonaté.**
- **Les eaux thermales émergent, par pression de la zone de recharge sur la branche ascendante chaude, au niveau du Jebel Oust (zone de décharge), à une température moyenne de 55 °C, et avec un débit variable en fonction du régime pluviométrique régional.**

B.I.3.2. Le captage actuel et la station balnéaire associée.

B.I.3.2.1. La redécouverte de la source chaude.

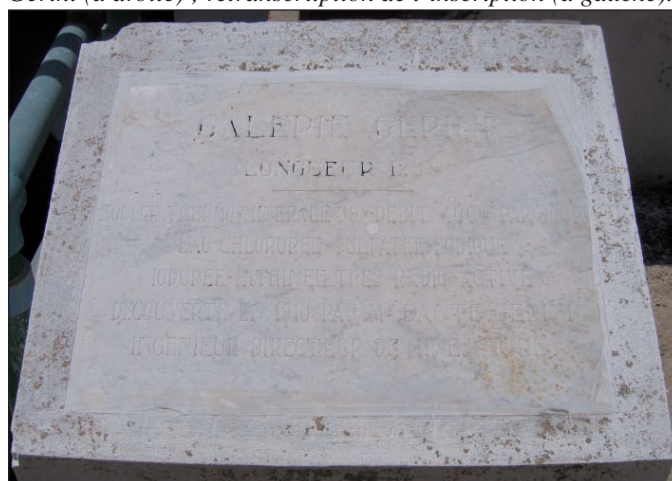
Lorsque, au début du XX^e s., l'ingénieur Dante Gérini entreprit de creuser des galeries de recherches minières dans le Jebel Oust, celui-ci constata dans quelques unes d'entre elles une croissance anormale de la température à partir d'une certaine profondeur ; l'air devenait rapidement très humide et irrespirable, transformant l'environnement en « une véritable étuve » d'après les témoignages, que le travail des ouvriers en fut réduit considérablement (Berthon, 1914). D. Gérini venait alors de percer et de redécouvrir l'aquifère thermal de Jebel Oust, perdu depuis la fin de l'époque antique. Finalement, l'eau thermale jaillit avec force, car sous pression, par un trou effectué au fond d'une galerie longue de 125 m au niveau du flanc oriental du petit Oust. Cette galerie, dite galerie « Gérini », et dont l'encaissant est formé de travertins anciens très karstifiés et de couches irrégulières d'oxydes de fer, donne accès à une vasque naturelle au sein de laquelle sourd actuellement l'eau thermale. A l'entrée immédiate de la galerie d'accès, une plaque commémorant les travaux de D. Gérini fut apposée (Fig. B.37).

Figure B.37. Plaque commémorative de la découverte de la source chaude par D. Gérini (à droite) ; retranscription de l'inscription (à gauche).

GALERIE GERINI
(LONGUEUR 125 m)

SOURCE THERMO-MINERALE 59° - DEBIT 400 m³
PAR JOUR

EAU CHLORUREE-SULFATEE-SODIQUE-
IODUREE LITHINEE TRES RADIO-ACTIVE
DECOUVERTE EN 1910 PAR Mr DANTE GERINI
INGENIEUR DIRECTEUR DE MINES TUNIS



B.I.3.2.2. L'exploitation de la source chaude par le complexe balnéaire.

Suite à sa redécouverte en 1907 par D. Gérini, l'eau thermale de Jebel Oust est exploitée, depuis 1976, pour l'alimentation d'un établissement thermal moderne où est pratiqué l'ensemble de la crénothérapie moderne. Les indications thérapeutiques sont celles des eaux chlorurées sodiques en général : rhumatismes (dégénératifs, inflammatoires), traumatismes ostéo-articulaires, diathèse arthritique, gynécopathies, et dermatologie.

Depuis son captage au fond de la « galerie Gérini », l'eau thermale est véhiculée par simple gravité dans des canalisations jusqu'à une station de pompage située à la sortie de la galerie. Depuis cette station de pompage, l'eau thermale est envoyée vers des réservoirs fermés (de stockage et de refroidissement) qui alimentent l'établissement thermal en eau thermale chaude et en eau thermale refroidie. Ainsi, deux eaux de température différente, une eau chaude à 55 °C et une eau refroidie à 30-40 °C, sont disponibles pour un fonctionnement optimal des pratiques balnéaires. L'ensemble fonctionne grâce à un double système de canalisations, qui permet de faire face au problème d'entartrage des tuyaux dû à la précipitation des carbonates. Ce système permet de remplacer la tuyauterie non-fonctionnelle, car colmatée par des dépôts de travertin, sans interrompre l'alimentation en eau et le fonctionnement du bâtiment de soins thermaux.

Le captage actuel se situe à environ 200 m du captage antique (Fig. B.38) à la cote de 121,70 m, soit plus bas que le second, et dernier, captage antique, situé à la cote de 124,10 m. Cette différence de niveau entre les deux captages, actuels et antique, reflète parfaitement la chute hydrostatique de l'aquifère thermal depuis la période antique. Il est encore impossible, à l'heure actuelle, d'attribuer cette chute du niveau de l'aquifère thermal depuis l'Antiquité soit à l'impact humain sur l'hydrogéosystème qui se traduit par une surexploitation des ressources hydriques du milieu, soit à des facteurs naturels qui peuvent être des conditions climatiques différentes (sécheresse plus importante) ou un (des) phénomène(s) tectonique(s) ayant perturbé le circuit hydrothermal.

B.I.3.2.3. Les deux environnements actuels de dépôt.

Le captage actuel de l'eau thermale consiste en une large vasque naturelle prenant forme dans une cavité d'une dizaine de mètres de circonférence moyenne et dont la hauteur varie de 2 à 3 mètres. La grotte est revêtue par des dépôts oxydes de fer générés par l'activité de l'eau thermale. Nous pouvons également y observer quelques croûtes ponctuelles de sel sur les parois, ainsi que quelques petites stalactites, de sel également, qui croissent au plafond.

Nos observations au cours des différentes missions sur le terrain ont permis de mettre en évidence la variabilité du niveau de l'eau dans cette vasque. De plus, ces variations du niveau hydrostatique sont repérables sur les parois de la grotte par des repères continus de précipitation de sel (marqués par des lignes continues qui apparaissent blanches sur la paroi de la grotte, fig. B.39). Le plus haut niveau de concrétion est repéré à une

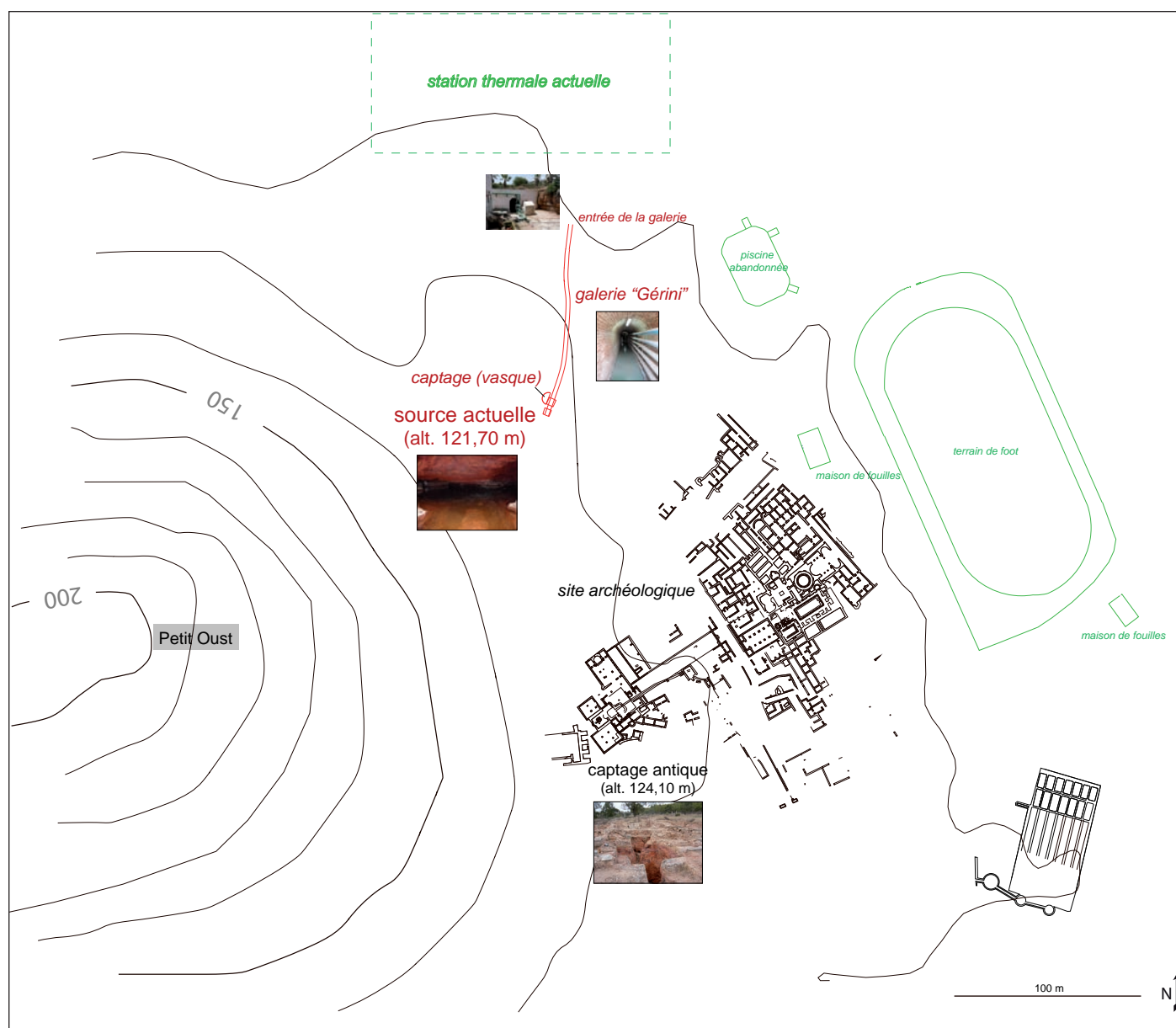


Figure B.38. Plan de situation des captages actuel et antique de Jebel Oust.

cote d'environ 2 m par rapport au fond de la vasque thermale. Ceci permet d'estimer une variation du niveau hydrostatique de l'aquifère thermal d'environ 2 m entre les périodes de pluie et les périodes sèches. Suivant le modèle géothermale régional défini (cf. B.I.3.1), nous savons que le débit de la source thermale est indirectement lié aux précipitations de la région. Les variations du niveau d'eau dans le captage sont une conséquence du régime variable des pluies dans la région.

Suite à une relative période de sécheresse, nous avons pu observer le niveau d'eau dans la grotte réduit au quasi-strict minimum. Néanmoins, le flux d'eau continu, indispensable au fonctionnement du complexe sanitaire, était maintenu grâce des canaux sur-creusés dans le plancher de la grotte. Ces canaux sont une réponse à la



*Figure B.39.
Le captage actuel de la source chaude
de Jebel Oust ; observons les lignes de
précipitation (en blanc) sur les parois
de la grotte.*

crainte des périodes de faible pluviosité¹ qui provoquent une baisse du niveau de l'eau dans la grotte, voir un assèchement total et irrémédiable, et permettent ainsi un écoulement continu même lors des périodes sèches.

L'observation des dépôts sédimentaires a permis de distinguer deux milieux de conditions de dépôt différentes dans le captage actuel et la galerie d'accès qui lui est associée :

- **un milieu de précipitation du fer** : dans la grotte thermale et dans la section amont de la galerie d'accès, jusqu'à une distance de 30 m depuis la source.
- **un milieu de précipitation des carbonates** : il débute dans la galerie, à partir d'une distance de 30 m depuis la source, et il se prolonge en aval sur quelques centaines de mètres.

Ce modèle actuel de morphologie de la grotte thermale et des conditions de précipitation des dépôts est primordial pour comprendre et établir le modèle de fonctionnement de la source antique (cf. B.III.1). En effet, le fonctionnement de la source thermale répond à des facteurs géodynamiques identiques à ceux de l'époque antique, puisque l'hydrogéosystème reste le même (c.-à-d. un système par pression, cf. B.I.3.1), avec uniquement un changement du niveau topographique de l'exutoire, plus bas d'environ 3 mètres à l'époque actuelle.

Les courbes de suivi du pH et de la température de l'eau thermale, que nous avons pu établir depuis la source jusqu'à la distance de 93 m dans la galerie « Gérini » (Fig. B.40), permettent de caractériser l'évolution de la nature de l'eau et de distinguer les deux environnements de dépôt. La mesure effectuée au niveau de l'évent

¹L'ingénieur en charge du réseau hydraulique du complexe sanitaire de Jebel Oust mentionne empiriquement un temps de réponse du débit de la source d'une durée de trois semaines, mais aucune quantification n'a pu être acquise. Ce temps de réponse, s'il s'avère constant avec le temps, principe que l'on peut facilement envisager considérant les caractéristiques géologiques de la région, est une information primordiale pour la compréhension de la morphologie du captage antique.

thermal (dans la grotte) présente une valeur en pH de 6,32 et une température de 54,5 °C. Immédiatement à la sortie de la grotte, c'est-à-dire 1 m en aval, le pH connaît une forte augmentation pour atteindre la valeur de 6,74, alors que la température reste quasiment identique, à 54,4 °C. La température de l'eau décroît progressivement tout au long de la galerie, en respectant deux épisodes de refroidissement : un premier de 0 à 30 m, où la température varie de 54,5 à 53 °C, soit une perte de 0,05 °C/m, et un second de 30 à 93 m, où l'on se rapproche de l'exutoire de la galerie et où la température décroît de 53 à 46,2 °C sur plus de 60 m, soit une perte, plus importante que pour la première fenêtre, de 0,1 °C/m.

Parallèlement, le pH de l'eau thermique croît progressivement tout au long de la galerie, phénomène expliqué par un dégazage progressif du CO₂ de l'eau, montrant néanmoins un saut de pH à partir de 30 m, limite entre la fin du milieu de précipitation de fer et le début de la précipitation des carbonates, qui apparaît lorsque le pH se neutralise. Le pH augmente de 7,01 à 7,52 jusqu'à 70 m, avant un nouveau pallier de stabilité à partir de 70 m jusqu'à 93 m.

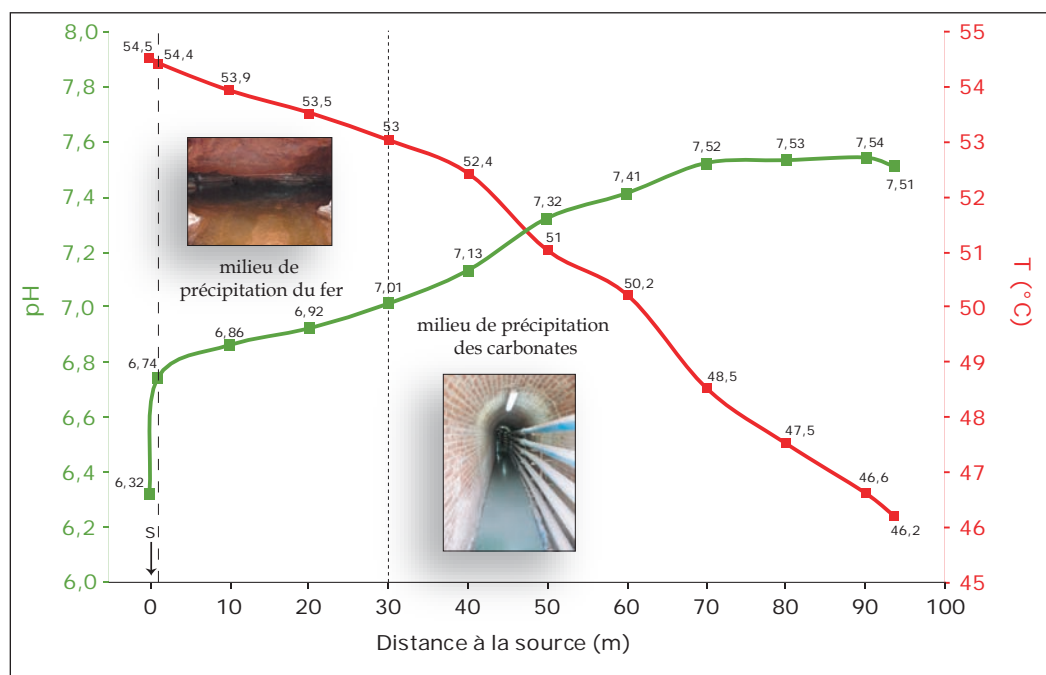


Figure B.40. Courbes d'évolution du pH (vert) et de la température (rouge) de l'eau chaude de la source thermique de Jebel Oust dans la galerie Gérini (S = Source).

B.II. LES *TRAVERTINS ANTHROPIQUES* DU SITE DE JEBEL OUST : CARACTÉRISATION GÉOLOGIQUE.

B.II.1. Le dépôt de travertins naturels : caractérisation morphologique.

Nous dénommons travertins *naturels*, par opposition aux *travertins* dits *anthropiques*, l'ensemble des travertins déposés avant l'occupation humaine sur le site de Jebel Oust et ses alentours, et l'exploitation de la source chaude dans l'Antiquité. Il a été possible de reconnaître et d'identifier ces travertins naturels à différents endroits sur le site, permettant ainsi de caractériser le modèle de dépôt sédimentaire pré-antique, avant que la dynamique sédimentaire du versant ne soit perturbée par les activités humaines, à partir du I^{er} siècle de notre ère.

B.II.1.1. Les travertins naturels dans le secteur du temple et de l'évent thermal.

Dans la partie supérieure du site archéologique, au niveau du complexe associant le temple et l'évent antique de la source chaude, les travertins naturels ont été reconnus et identifiés sur une relativement large étendue, en partie grâce aux aménagements anthropiques effectués autour de l'évent thermal. La première observation, et non des moindres, est l'absence de dépôt de travertin sur le versant en amont du (des) captage(s) antique(s). Ceci reflète que la localisation de l'évent avant l'exploitation de la source, se trouvait à l'endroit identique de la source exploitée à l'époque antique.

La couche de travertin déposée avant l'époque antique est repérée en plusieurs endroits, notamment grâce aux travaux d'aménagements réalisés autour de l'évent thermal durant l'Antiquité. Les deux creusements réalisés, correspondant aux deux captages successifs, ont permis de mettre au jour la séquence sédimentaire constituant le substrat géologique local sur lequel viendront s'appuyer les constructions humaines. C'est ainsi que dans le secteur cultuel, à l'endroit exact du captage de la source chaude, et reposant sur une brèche rougeâtre, le dépôt naturel forme une couche de travertin jaunâtre et grossièrement laminé, dont l'épaisseur croît vers l'aval (**a** sur Fig. B.41) : de quelques centimètres à son origine, cette couche de travertin atteint près de 30 cm au niveau du départ de l'aqueduc thermal, dans la partie aval du captage antique. C'est sur cette couche de travertin que viennent s'appuyer la partie centrale des constructions antiques liées au culte de la source.

Cette couche de travertin naturel est également observée au niveau du départ de l'aqueduc acheminant l'eau thermale vers les structures situées en contrebas. Cet aqueduc, de près de 6 m de profondeur, est creusé directement dans la roche naturelle, qui est du travertin à lamines grossières. Nous allons voir que ce banc de travertin naturel, repéré ici dans sa partie amont, est identifié également plus en aval sur le versant, dans la portion intermédiaire de l'aqueduc.

B.II.1.2. Les travertins naturels sur la pente/*clivus*.

La majorité des sondages archéologiques réalisés sur la pente menant au sanctuaire ont atteint le substrat géologique. C'est ainsi qu'au fond de la plupart des sondages, nous avons pu retrouver l'affleurement des travertins naturels qui nappent l'ensemble du substrat du versant oriental du Petit Oust.

Le secteur S20, situé à mi-pente du site, permet de retrouver la course de l'aqueduc thermal vers l'édifice thermal situé en contrebas. Comme nous l'avons vu précédemment lors de son départ dans le secteur du sanctuaire, cet aqueduc est creusé dans la roche naturelle qui est du travertin jaunâtre et grossièrement laminé (**b** sur Fig. B.41). De plus, les dalles utilisées pour la couverture de l'aqueduc sont elles-mêmes en travertin, provenant très certainement directement de l'extraction du travertin naturel lors du creusement de cet aqueduc. Plus en aval, dans deux petits secteurs encore en cours d'étude (S21 et S22), il est également possible d'observer le cheminement de l'aqueduc, creusé dans le travertin déposé avant l'époque antique.

B.II.1.3. Les travertins naturels dans la partie de l'édifice thermal.

Au niveau de l'édifice thermal, le travertin naturel n'a été reconnu qu'à un seul endroit, dans un sondage réalisé dans la salle T3. Ce sondage a permis de mettre au jour une séquence (**c** sur Fig. B.41) caractérisée par :

- une couche de travertins, déposés par la source chaude avant son exploitation antique ;
- un niveau de sol isohumique calcaire (rendosol*) qui se développe directement sur les travertins précédents, et avant l'installation de l'édifice thermal, sur une dizaine de centimètres de puissance ;
- un niveau de fondation et de préparation du sol de T3, de 15 à 20 cm d'épaisseur ;
- un sol dallé de quelques centimètres d'épaisseur, qui correspond au niveau de circulation de la salle T3.

Le profil ainsi défini marque très nettement la transition entre milieu naturel et milieu anthropisé. Sous les couches archéologiques que sont le niveau de sol de la salle T3 et le niveau de préparation de celui-ci, sont fossilisés un paléosol et les travertins naturels. L'épaisseur totale de cette couche de travertin n'a pu être définie à cet endroit car la limite inférieure de la couche n'a pu être atteinte pour cause d'exiguïté du sondage effectué. Néanmoins, ce niveau représente l'unique enregistrement que l'on possède, à ce jour, du dépôt de travertin par la source chaude avant l'occupation antique, au sein du secteur thermal du site.

B.II.1.4. Les travertins naturels en marge des structures archéologiques.

Les travertins déposés avant l'occupation antique ont pu être observés à deux endroits à proximité du site, sans lien direct avec des structures archéologiques. D'abord, l'aménagement du petit chemin menant à la maison et au dépôt, situés à une centaine de mètres en contrebas des vestiges antiques, a permis de dégager un petit affleurement des dépôts du versant du Jebel Oust. Au sein de cette séquence de dépôts sédimentaires sont identifiés des travertins, correspondant à un dépôt antérieur à l'occupation humaine. En second lieu, le vestige

d'un front de taille, d'époque inconnue, est préservé dans des dépôts sédimentaires, à proximité immédiate du site, à environ 100 m au nord-ouest de la citerne la plus orientale parmi les trois grandes citernes d'eau douce. Au sein de cet affleurement d'environ deux mètres de puissance, nous pouvons observer un dépôt de travertins lié à l'activité de la source chaude de Jebel Oust, avant son exploitation antique.

Ces deux dépôts situés en marge des vestiges antiques étudiés prennent leur importance dans la reconstitution de la morphologie du dépôt de travertin pré-antique, représentant des témoins directs de l'étendu du dépôt ancien.

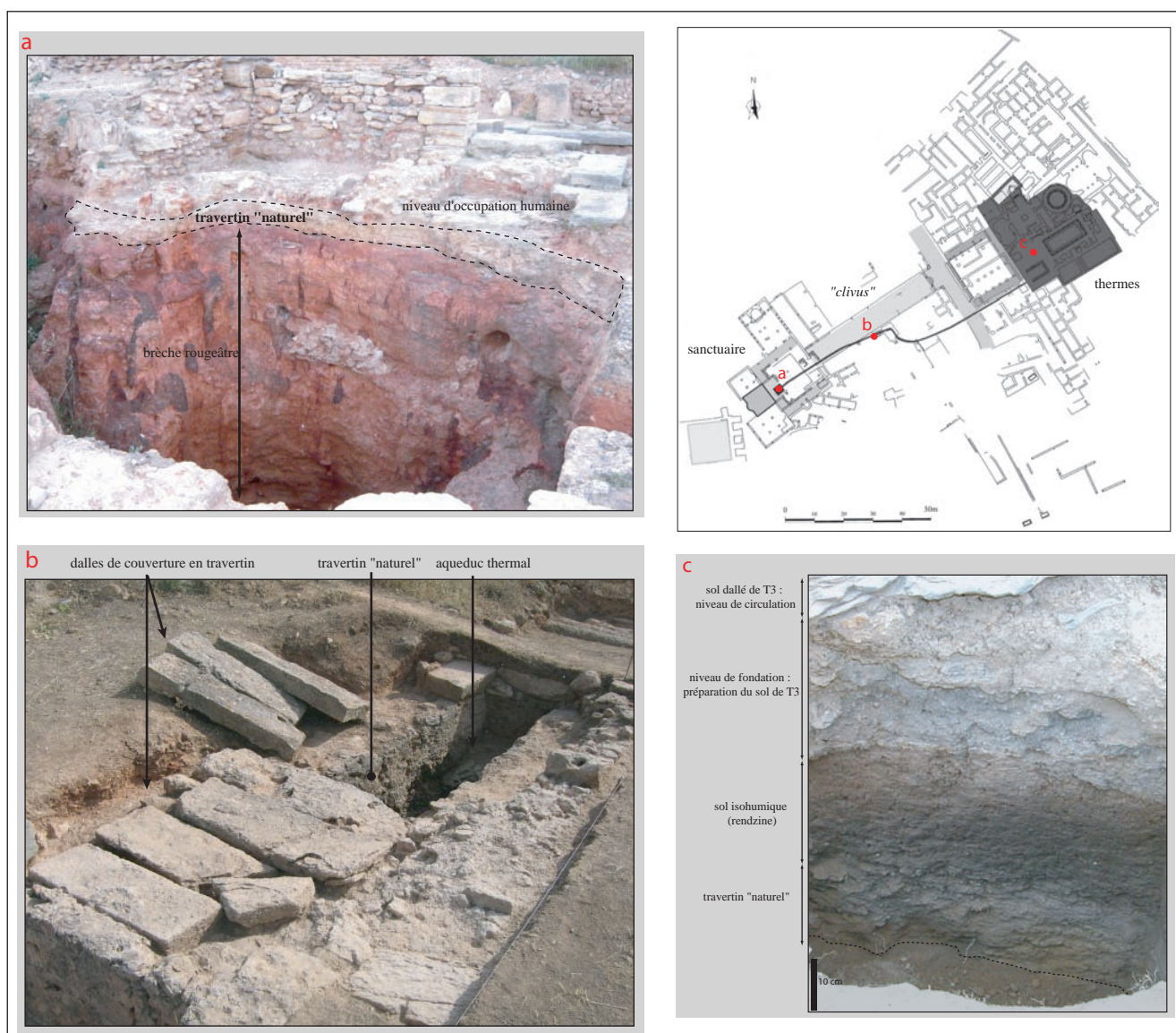


Figure. B.41. Affleurement du travertin naturel au niveau du sanctuaire (a), du clivus (b) et des thermes (c).

Synthèse : un modèle naturel de dépôt de pente.

Le dépôt de travertin naturel sur le versant du Petit Oust est nettement identifié au niveau du secteur cultuel du site, en haut de versant, avec un banc de travertin de quelques centimètres de puissance, localisé sous les structures archéologiques. La couche de travertin s'épaissit vers l'aval pour atteindre plus d'un mètre de puissance dans la partie intermédiaire du site, au sein des parois de l'aqueduc qui achemine l'eau thermale. Dans le secteur aval, les témoins du travertin naturel demeurent rares dans l'édifice thermal. Néanmoins, des affleurements sont localisés aux alentours des structures archéologiques et apportent une lumière sur l'extension spatiale du travertin.

L'ensemble des observations de la couche de travertin naturel, déposé par la source chaude avant l'exploitation de celle-ci à l'époque antique, permet d'identifier la morphologie du dépôt de travertin avant l'occupation humaine. Il s'agit d'un modèle de dépôt de pente (*slope depositional model*) (cf. A.1.2.1.1).

Plus précisément, les travertins naturels du site de Jebel Oust suivent un modèle de dépôt en pente douce, la pente du versant sur lequel est installé le site étant inférieure à 8 %. Grâce aux affleurements témoins de la présence du travertin naturel sur le versant du Petit oust, il est possible de modéliser l'étendu et la morphologie du lobe de travertins généré par la source chaude avant son exploitation à l'époque antique (Fig. B.42).



B.II.2. Caractérisation des *travertins anthropiques* antiques.

Nous nous intéresserons dans cette partie du manuscrit aux *travertins anthropiques*, déposés et préservés dans les constructions humaines et plus particulièrement à leur caractérisation géométrique, morphologique et sédimentologique. Notre exposé suivra un cheminement géographique menant de la source chaude et son sanctuaire associé jusqu'aux thermes situés en aval, en empruntant la course de l'aqueduc thermal reliant les deux secteurs. Nous pourrions ainsi proposer une classification typologique des *travertins anthropiques* de Jebel Oust, qui pourra être comparée à la caractérisation des travertins naturels identifiés sur le versant (cf. *supra*).

B.II.2.1. Caractérisation géométrique et morphologique des *travertins anthropiques* antiques.

B.II.2.1.1. Les *travertins anthropiques* du complexe sanctuaire/source chaude :

les dépôts proximaux d'une eau captée.

Les dépôts de *travertins anthropiques* proximaux observés sur le site de Jebel Oust sont situés dans le secteur du sanctuaire. La complexité et la stratigraphie des dépôts sédimentaires observés dans cette partie du site sera détaillée ultérieurement dans ce manuscrit (cf. B.III.1). Les premiers dépôts de *travertins anthropiques*, entendons par là les dépôts les plus en amont du site, sont repérés au départ strict de l'aqueduc dont la course débute au niveau de la cavité hydrothermale. Ces dépôts se forment lorsque l'eau thermique, qui émerge dans la grotte, s'engouffre dans l'aqueduc (1 sur la figure B.43). Leur géométrie et leur morphologie vont être entièrement contrôlées par la morphologie du canal creusé dans le substrat. Les dépôts ont une forme en U, avec des épaulements le long des deux parois de l'aqueduc, typique des dépôts d'aqueducs lorsque le flux d'eau est relativement turbulent. De nature très compact et de couleur jaunâtre, le dépôt présente des lamines grossières, bien développées et nettement visibles, en particulier dans les portions verticales adhérentes aux parois du canal.

B.II.2.1.2. Les *travertins anthropiques* intermédiaires de l'aqueduc thermal.

Les *travertins anthropiques* ont pu être identifiés sur le *clivus*, à mi-pente, au niveau d'un « regard » percé dans l'aqueduc thermal (2 sur la figure B.43). A l'instar des dépôts proximaux cités précédemment, leur morphologie est entièrement contrôlée par celle de l'aqueduc creusé dans le substrat. Ils présentent deux aspects différents visibles à l'œil nu. Un premier macrofaciès vacuolaire formant de légers épaulements sur les deux parois montre un dépôt très poreux, formé par de fines lamelles de précipitation de carbonates agencées en position chaotique. Un second macrofaciès présente un aspect extrêmement laminé, rappelant la morphologie en « mille-feuilles » (*puff-pastry*) issue du phénomène de « glace d'eau chaude » (*hot water ice*), et dont chaque lamine précipitée est horizontale ou subhorizontale. Dans ce dépôt en mille-feuilles apparaissent certains éléments qui, participant activement ou non à la précipitation carbonatée, appartiennent au travertin. Nous pouvons noter la présence de quelques gastéropodes véritablement fossilisés par l'encroûtement carbonaté, ainsi que des matériaux archéologiques (fragments de tubes de voûte, etc.). Quelques cailloux sont également présents et viennent perturber la sédimentation carbonatée. En effet, transportés par l'eau thermique circulant

dans l'aqueduc, ces cailloux, lors de leur dépôt sur le « fond » de l'aqueduc, viennent impacter le sédiment en cours de formation ou très récemment formés (les films microbiens = *microbial mats*). Ceci a pour conséquence de briser la (les) lamine(s) horizontale(s), encore fragiles et friables, en plusieurs petits morceaux qui viendront ensuite s'accoler à l'élément perturbateur de manière plus ou moins aléatoire ou chaotique, gagnant ainsi une position verticale ou subverticale.

B.II.2.1.3. La diversité des *travertins anthropiques* de l'édifice thermal : les dépôts distaux.

Les *travertins anthropiques* observés dans la partie thermale du site de Jebel Oust présentent une certaine diversité dans leur morphologie, leur géométrie et dans leurs caractéristiques sédimentologiques. Plusieurs grands types de dépôt peuvent être ainsi différenciés, suivant la forme et la position de ces travertins. Nous identifions quatre principaux types auxquels est associée une nomenclature permettant une première approche générale : les travertins de piscine, les travertins muraux, les travertins de canalisation et les travertins en amas. Pour chacun de ces types de dépôt, un faciès sédimentaire principal caractérisant le travertin est associé.

B.II.2.1.3.1. Les travertins de piscines (3a et 3b sur la figure B.43).

Parmi les dépôts de *travertins anthropiques* distaux, les dépôts préservés dans les grandes piscines thermales sont les plus importants, par leur taille et par le volume de sédiment précipité. Dans ces grandes pièces, les dépôts sont venus mouler les marches et contremarches des escaliers d'accès aux bassins, pouvant atteindre une vingtaine de centimètres d'épaisseur, et générant une morphologie particulière au travertin. Ils ont également moulé les bases de colonnes, lorsque les piscines en sont pourvues, ou les bases de piédestal de statue. De même, ils drapent, sur quelques centimètres d'épaisseur, le sol correspondant au fond des bassins et le sol des espaces de circulation périphériques. Enfin, ils forment un bourrelet d'une dizaine de centimètres d'épaisseur à la base des murs des pièces, au-dessus du sol de l'espace de circulation périphérique.

Deux types de travertins de piscines se distinguent selon leur faciès : un travertin présentant des lamines très fines, de l'ordre (infra)millimétrique (3a) et un travertin présentant des lamines plus épaisses et plus vacuolaires (3b). Ces deux types de faciès seront définis plus précisément dans un chapitre ultérieur (cf. B.III.2.1), en intégrant les conditions de leur environnement de dépôt.

B.II.2.1.3.2. Les travertins muraux (3c et 3d sur la figure B.43).

Comme leur nom l'indique, ces dépôts sont venus recouvrir les murs de certaines pièces des thermes. Nous distinguons, au sein de ces dépôts verticaux, deux types de travertin selon leur puissance et leur faciès sédimentaire :

- Des dépôts de travertins muraux fins (3c), de quelques centimètres d'épaisseur au maximum, qui se développent dans des pièces utilisées comme petits bains. Le faciès dominant dans ce type de dépôt est

un faciès laminé, de type alterné ou répétitif.

- Des dépôts de travertins muraux épais (3d), pouvant atteindre plusieurs dizaines de centimètres d'épaisseur et dont la morphologie présente un « ventre », leur conférant un aspect buissonnant. Ils se sont développés dans les grandes pièces situées dans la partie sud de l'édifice thermal, ainsi que dans certaines pièces de taille moyenne localisées au cœur de l'édifice. Leur faciès présente une grande porosité et une structure spongieuse, où la présence de fines lamines de carbonates est repérée.

Pour ces deux types de travertins muraux, le sol des salles dans lesquelles ils se déposent est également recouvert par léger encroûtement, de quelques centimètres d'épaisseur.

B.II.2.1.3.3. Les travertins de canalisation (3e sur la figure B.43).

Ils sont les plus nombreux mais également les plus petits en taille et en volume de sédiment précipité, puisqu'ils sont restreints aux tuyaux et aux canalisations. Leur géométrie est variable, puisqu'ils peuvent soit occuper toute la périphérie du tuyau et obstruer ainsi l'écoulement d'eau, soit, le plus souvent, combler partiellement la canalisation, en se déposant sur le fond et en formant de légers épaulements sur les parois, pour donner au dépôt la morphologie en U typique des aqueducs (3e). Leur faciès est caractérisé, dans la grande majorité des cas, par une fine lamination, alternée ou répétitive.

B.II.2.1.3.4. Les amas de travertins (3f et 3g sur la figure B.43).

Au sein de la diversité de *travertins anthropiques* du site de Jebel Oust en position distale, les travertins formant un amas occupent une position particulière. Ils sont situés soit au débouché d'une canalisation ou d'un tuyau, soit dans certaines pièces lorsqu'il existe une rupture de pente dans le trajet emprunté par le flux d'eau. Ainsi, deux types d'amas de travertins peuvent être distingués :

- **Un amas complexe** (3f) : il s'est développé au débouché de la canalisation alimentant une des grandes piscines thermales, formant un véritable bouchon. Il atteint près de dix mètres de puissance à l'origine, puisqu'il a été largement raboté lors des fouilles entreprises par M. Fendri, afin de dégager la piscine dans laquelle l'amas s'est développé. La morphologie et la géométrie de ce dépôt rappellent fortement celles des dépôts de concrétions en forme d'énormes « amas dissymétriques », conséquences de débordement issues de fuites de l'aqueduc de Nîmes (Guendon et Vaudour, 2000). Il présente un faciès complexe, comprenant une matrice micritique dans laquelle sont mêlées de nombreuses et fines lamines carbonatées en position chaotique et de nombreux éléments détritiques.
- **Un travertin de cascade** (3g) : il s'est développé au sein d'un parcours emprunté par le flux d'eau thermique lors d'une rupture de pente créée par la présence de la margelle d'accès à un petit bassin. Sa morphologie suit celle des travertins se développant suivant le modèle de dépôt en cascade (qui appartient

aux modèles de dépôt de pente). Ce travertin, de couleur orange et de plusieurs dizaines de centimètres de puissance, présente un faciès laminé comprenant des micro-terrasses.

Synthèse : la grande diversité morphologique des *travertins anthropiques* antiques.

La diversité des *travertins anthropiques*, tant au niveau de leur morphologie et de leur faciès sédimentaire, est remarquable. Depuis les dépôts proximaux, localisés au départ de l'aqueduc thermal au niveau du captage de la source chaude, jusqu'aux dépôts les plus distaux, situés dans l'édifice thermal, la variété morphologique du travertin se distingue nettement. Ainsi, d'un dépôt dont la morphologie répond à la morphologie de l'aqueduc thermal, au niveau du captage et à mi-pente, le secteur aval propose une diversité des morphologies de dépôt, dans le secteur thermal du site antique.



Figure B.43. Les travertins anthropiques du site de Jebel Oust, au niveau du sanctuaire (1), de l'aqueduc à mi-pente (2) et des thermes (3) ; voir commentaires dans le texte.

B.II.2.1. Caractérisation géochimique des *travertins anthropiques* antiques.

Afin de caractériser la composition isotopique des *travertins anthropiques* du site de Jebel Oust, nous avons analysé les isotopes stables du carbone et de l'oxygène sur des échantillons représentatifs de la diversité des travertins préservés sur le site. A l'instar de la caractérisation géométrique des dépôts anthropiques, nous aborderons cette caractérisation de la signature géochimique des travertins selon un parcours de l'amont vers l'aval, qui débutera par la zone cultuelle et la source chaude, continuera par la portion située à mi-pente sur le versant (35 m depuis la source), pour terminer au niveau des thermes antiques, en zone distale (90 m depuis la source).

B.II.2.1.2. Les travertins de Jebel Oust au sein des travertins mondiaux.

Avec une valeur moyenne ($n=391$ échantillons répartis sur l'ensemble du site) de $-8,67$ ‰ PDB en $\delta^{18}\text{O}$ et de $1,82$ ‰ PDB en $\delta^{13}\text{C}$, les dépôts carbonatés préservés dans les structures archéologiques du site de Jebel Oust s'inscrivent parfaitement au sein des travertins *s.s.* mondiaux (Fig. B.44). La valeur moyenne du $\delta^{13}\text{C}$ reflète clairement l'influence des formations calcaires mésozoïques sur la composition isotopique de l'eau lors de son trajet en profondeur. Quelques excursions vers des valeurs très négatives (jusqu'à $-8,72$ ‰) sont influencées par une contribution plus négative de matières organiques sur quelques échantillons de travertin précipités par une eau moins lourde. Les valeurs en $\delta^{18}\text{O}$ présentent une grande variabilité, entre $-13,38$ et $-5,72$ ‰ PDB, et s'inscrivent dans la gamme typique des eaux (très) chaudes.

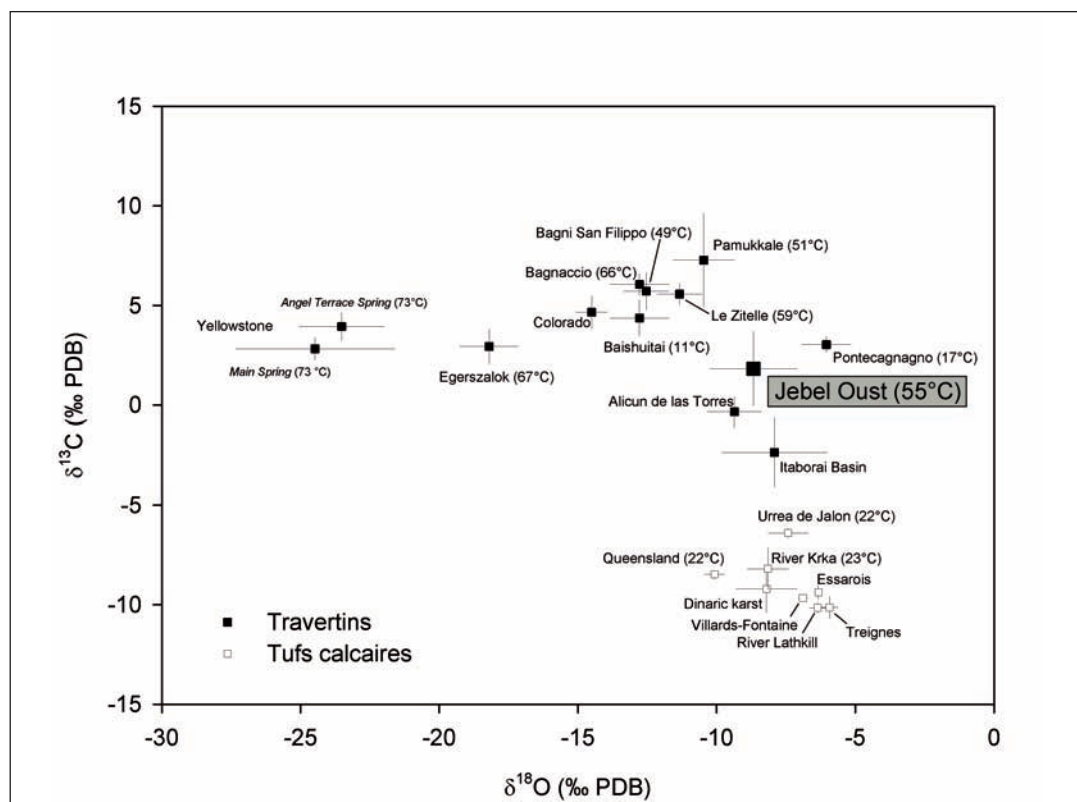


Figure B.44. Signature isotopique des travertins de Jebel Oust dans le diagramme $\delta^{18}\text{O}/\delta^{13}\text{C}$ (PDB) des travertins *s.l.* mondiaux (cf. Fig. A.28).

B.II.2.1.2. Des dépôts proximaux jusqu'aux dépôts distaux.

- **Les dépôts proximaux du sanctuaire (*vent*) :**

Les isotopes stables du carbone et de l'oxygène ont été analysés sur un échantillon (JO-07-124) provenant du dépôt recouvrant les parois du « puits d'accès » à la cavité hydrothermale. Cet échantillon possède des valeurs de 2,17 ‰ PDB et de -11,99 ‰ PDB en $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$, respectivement.

- **Les dépôts de l'aqueduc à mi-pente (*proximal slope*) :**

Des analyses isotopiques (Tab. 3¹) ont été réalisées sur des échantillons prélevés dans le travertin en mille-feuilles (*puff-pastry travertine*) préservé dans l'aqueduc thermal, au niveau du « regard » percé dans l'aqueduc et les dépôts qui le colmatent. La puissance et la complexité de ce dépôt, entendons par là le caractère extrêmement fin et friable des lamines de carbonates qui le composent, nous a amené à adopter une stratégie de prélèvements particulière. Nous avons prélevé une séquence de ce dépôt en mille-feuilles par « paquets » de lamines, afin de séparer cette séquence chronologique en différentes sections représentatives. Ainsi, l'échantillon JO-07-86 a été prélevé au sein d'une séquence de très fines et extrêmement friables lamines oranges qui scelle la séquence de travertin. Les échantillons JO-07-87 (n=14 points d'analyses), JO-07-88 (n=11), JO-07-89 (n=5), JO-07-90 (n=7), JO-07-91 (n=6), JO-07-92 (n=4) et JO-07-93 (n=7) correspondent chacun à un « paquet » de lamines dans lesquels un certain nombre d'analyses (*bulks*) ont été réalisées.

Enfin, les échantillons JO-07-95 et JO-07-96 sont deux séquences de ce travertin en *puff-pastry* pour lesquelles les prélèvements ont été effectués à l'échelle de la lamine (31 lamines échantillonnées pour JO-07-95, 24 lamines échantillonnées pour JO-07-96). Ces deux échantillons ont été prélevés dans la coupe est du secteur 20, qui fait face à la coupe ouest précédente.

L'échantillon JO-07-86, pour lequel 7 analyses ont été effectuées (n=7), offre une gamme de valeurs isotopiques entre 1,78 et 3,68 ‰ PDB pour le $\delta^{13}\text{C}$ et entre -11,42 ‰ et -9,97 ‰ PDB pour le $\delta^{18}\text{O}$. La gamme des valeurs isotopiques de l'échantillon JO-07-87 (n=14) s'étale entre -0,52 et 2,34 ‰ et entre -9,74 et -6,59 ‰ pour le $\delta^{13}\text{C}$ et le $\delta^{18}\text{O}$, respectivement. L'échantillon JO-07-88 (n=11) présente des valeurs en $\delta^{13}\text{C}$ comprises entre 0,28 et 2,56 ‰ et entre -8,74 et -6,94 ‰ en $\delta^{18}\text{O}$. Le $\delta^{13}\text{C}$ et le $\delta^{18}\text{O}$ de l'échantillon JO-07-89 (n=5) présentent des valeurs comprises entre 1,88 et 2,94 ‰ et entre -8,65 et -8,24 ‰, respectivement. L'échantillon JO-07-90 (n=7) offre une gamme de valeurs en $\delta^{13}\text{C}$ comprise entre 2,54 et 2,93 ‰ et en $\delta^{18}\text{O}$ entre -8,81 et -7,91 ‰. L'échantillon JO-07-91 (n=6) offre une gamme de valeurs comprise entre 2,66 et 2,99 ‰ pour le $\delta^{13}\text{C}$ et entre -9,35 et -8,81 ‰ pour le $\delta^{18}\text{O}$. L'échantillon JO-07-92 (n=4) présente des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ comprises entre 2,86 et 3,31 ‰ et de $\delta^{18}\text{O}$ entre -10,21 et -8,86 ‰.

Les échantillons analysés à une résolution à l'échelle de la lamine présentent des valeurs en $\delta^{13}\text{C}$ comprises

¹Les résultats des analyses de la composition isotopique des travertins du secteur S20 sont donnés en annexe (cf. Annexe A).

entre 1,30 et 3,03 ‰ pour JO-07-95 (n=31) et entre 2,10 et 3,32 ‰ pour JO-07-96 (n=24) ; les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ sont comprises entre -9,77 et -7,42 ‰ pour JO-07-95 et entre -9,13 et -8,20 ‰ pour JO-07-96.

Pour l'échantillon JO-07-86 (n=7), prélevé dans la séquence de fines lamines oranges qui scelle le dépôt de travertin, la valeur moyenne du $\delta^{13}\text{C}$ est 2,93 ‰ et celle du $\delta^{18}\text{O}$ est -10,65 ‰. Concernant les *bulks* successifs de lamines prélevés dans le dépôt de travertin en mille-feuilles, ils présentent des valeurs moyennes en $\delta^{13}\text{C}$ et en $\delta^{18}\text{O}$ de : 1,30 et -10,65 ‰ (pour l'échantillon JO-07-87, n=14) ; 1,98 et -8,10 ‰ (JO-07-88, n=11) ; 2,56 et -8,52 ‰ (JO-07-89) ; 2,75 et -8,40 ‰ (JO-07-90, n=6) ; 2,86 et -9,06 ‰ (JO-07-91, n=6) ; 3,11 et -9,16 ‰ (JO-07-92, n=4) ; et 3,08 et -9,27 ‰ (JO-07-93, n=7). Les deux échantillons prélevés à l'échelle de la lamine présentent une valeur moyenne en $\delta^{13}\text{C}$ de 2,18 ‰ (JO-07-95, n=95) et 2,78 ‰ (JO-07-96, n=24), et une valeur moyenne en $\delta^{18}\text{O}$ de -8,74 ‰ (JO-07-95) et -8,76 ‰ (JO-07-96).

Les analyses à l'échelle de la lamine de l'échantillon JO-07-95 (Fig. B.45) montrent une anti-corrélation entre les valeurs du $\delta^{18}\text{O}$ et du $\delta^{13}\text{C}$. Les valeurs ne présentent pas de variation régulière (cyclicité) à l'échelle de la lamine, mais il existe une certaine variabilité de la gamme du $\delta^{18}\text{O}$ entre ~ -9 et -8 ‰ et dans la gamme du $\delta^{13}\text{C}$ entre ~ 2 et 3 ‰. Dans le contexte de l'aqueduc couvert par des dalles, ces variations reflètent une variabilité de la température de la source à l'émergence (liée aux variations de son débit) et de l'activité microbienne, responsable du dépôt en *puff-pastry*.

Sur un ensemble de 116 analyses des isotopes stables du carbone et de l'oxygène, les *travertins anthropiques* situés à mi-pente, au sein de l'aqueduc thermal, présentent une valeur moyenne en $\delta^{18}\text{O}$ de -8,73 ‰ PDB et en $\delta^{13}\text{C}$ de 2,40 ‰ PDB.

<i>Echantillon</i>	<i>n</i>	moyenne du $\delta^{18}\text{O}$ (‰ PDB)	écart-type du $\delta^{18}\text{O}$	moyenne du $\delta^{13}\text{C}$ (‰ PDB)	écart-type du $\delta^{13}\text{C}$
<i>JO-07-86</i>	7	-10,65	0,5	2,93	0,78
<i>JO-07-87</i>	14	-7,91	0,8	1,3	0,84
<i>JO-07-88</i>	11	-8,1	0,56	1,98	0,67
<i>JO-07-89</i>	5	-8,52	0,17	2,56	0,41
<i>JO-07-90</i>	7	-8,4	0,31	2,75	0,14
<i>JO-07-91</i>	6	-9,06	0,18	2,86	0,13
<i>JO-07-92</i>	4	-9,16	0,11	3,11	0,16
<i>JO-07-93</i>	7	-9,27	0,48	3,08	0,19
<i>JO-07-95</i>	31	-8,74	0,49	2,18	0,38
<i>JO-07-96</i>	24	-8,76	0,26	2,78	0,31

Tableau 3. Moyenne et écart-type des valeurs isotopiques des travertins de l'aqueduc antique de Jebel Oust.

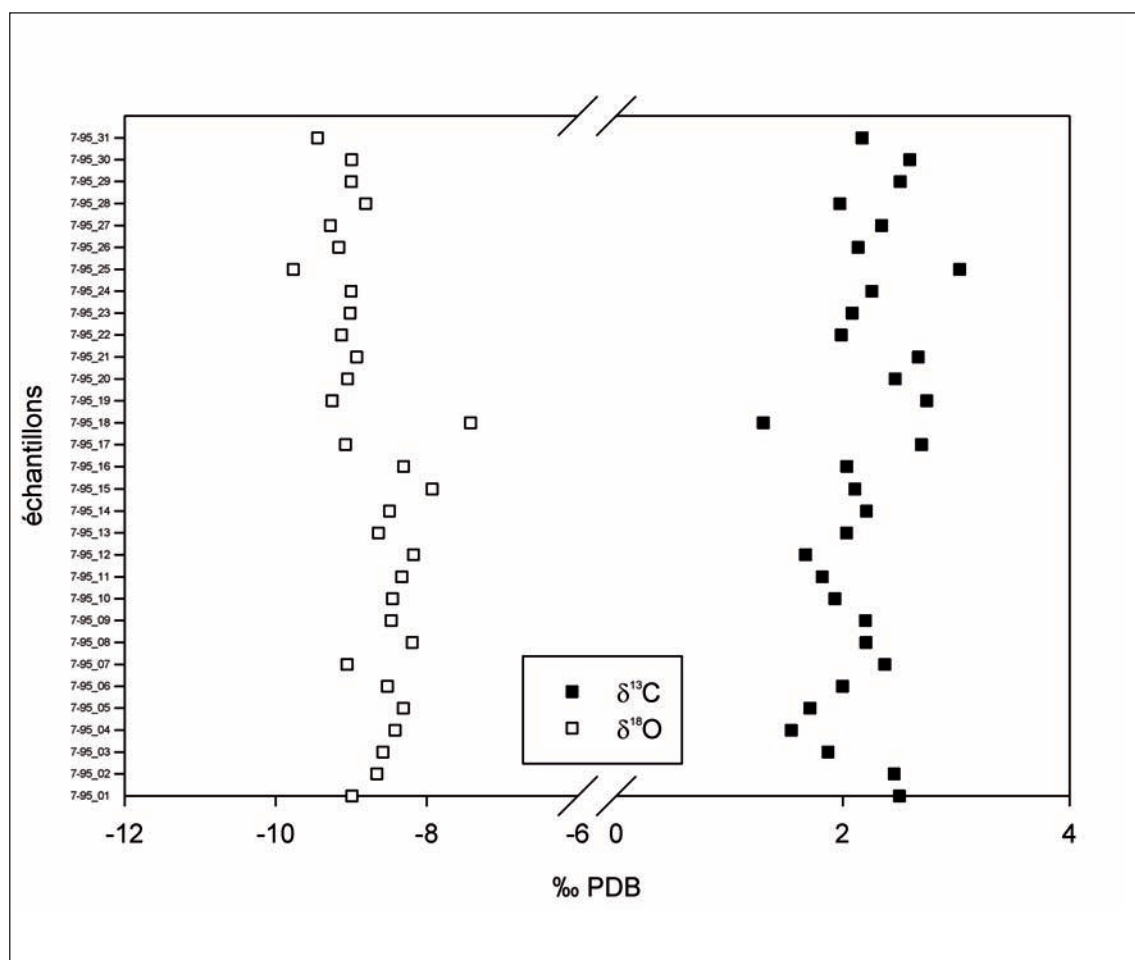


Figure B.45. Évolution des valeurs du $\delta^{18}\text{O}$ et du $\delta^{13}\text{C}$ le long de l'échantillon laminé JO-07-95 de l'aqueduc thermal de Jebel Oust.

• Les dépôts distaux des thermes (*distal slope*) :

L'analyse des isotopes stables de l'oxygène et du carbone a été réalisée sur les *travertins anthropiques* des différentes salles de l'édifice thermal (Tab. 4)¹, en position distale par rapport à la source chaude. Les travertins laminés des grande salles rectangulaires T1 (JO-05-38, n=10 ; JO-07-49, n=29) et T5 (JO-05-39, n=6 ; JO-07-44, n=21 ; JO-07-41, n=12) ont une valeur moyenne de -8,97 et -8,62 ‰ PDB en $\delta^{18}\text{O}$ et de 2,22 et 2,01 ‰ en $\delta^{13}\text{C}$, respectivement. Les travertins de la salle circulaire T9 (JO-07-66, n=44 ; JO-07-63, n=18) ont une valeur moyenne de -8,74 ‰ en $\delta^{18}\text{O}$ et 1,15 ‰ en $\delta^{13}\text{C}$. Concernant les grandes salles situées dans la partie sud de l'édifice, les travertins à structure spongieuse de la salle T19 (JO-07-106, n=5), T20 (JO-05-53, n=14) et T23 (JO-06-10, n=15) ont des valeurs respectives de -6,79 ‰, -7,46 ‰ et -6,87 ‰ en $\delta^{18}\text{O}$ et de 2,89 ‰, 3,52 ‰ et 3,91 ‰ en $\delta^{13}\text{C}$. Les travertins à structure spongieuse des salles T11 (JO-05-37, n=12), T12 (JO-05-29, n=12) et T13 (JO-07-103, n=1), situées au cœur de l'édifice thermal, présentent des valeurs de -6,68 ‰, -7,28 ‰ et -7,06 ‰ en $\delta^{18}\text{O}$ et de 3,50 ‰, 3,13 ‰ et 3,70 ‰ en $\delta^{13}\text{C}$. Enfin, les travertins laminés des petites pièces T4 (JO-07-56, n=13), T6 (JO-10-30, n=8 ; JO-07-121, n=6 ; JO-07-122, n=8), et T15 (JO-07-67, n=13) ont des valeurs de -6,11 ‰, -10,74 ‰ et -8,36 ‰ en $\delta^{18}\text{O}$ et de -2,30 ‰, -1,37 ‰ et 0,99 ‰ en $\delta^{13}\text{C}$, respectivement.

¹Les résultats des analyses de la composition isotopique des travertins des secteurs distaux sont donnés en annexe (cf. Annexe C).

Salle	n	moyenne du $\delta^{18}\text{O}$ (‰ PDB)	écart-type du $\delta^{18}\text{O}$	moyenne du $\delta^{13}\text{C}$ (‰ PDB)	écart-type du $\delta^{13}\text{C}$
T1	39	-8,97	0,9	2,22	0,67
T4	13	-6,11	0,34	-2,3	1,32
T5	39	-8,62	1,31	2,01	1,7
T6	22	-10,74	2,03	-1,37	3,23
T9	62	-8,74	1,14	1,15	1,44
T11	12	-6,68	0,55	3,5	0,46
T12	12	-7,28	0,55	3,13	0,64
T13	1	-7,06	-	3,7	-
T15	13	-8,36	0,39	0,99	0,86
T19	5	-6,79	0,53	2,89	1,25
T20	14	-7,46	0,34	3,52	0,43
T23	15	-6,87	0,42	3,91	0,32

Tableau 4. Moyenne et écart-type des valeurs isotopiques des travertins des thermes antiques de Jebel Oust.

Synthèse de l'analyse des isotopes stables de l'oxygène et du carbone des *travertins anthropiques* de Jebel Oust :

Dans un diagramme $\delta^{18}\text{O}/\delta^{13}\text{C}$ (‰ PDB) (Fig. B.46), les signatures isotopiques des *travertins anthropiques* de Jebel Oust présentent une répartition caractéristique depuis les dépôts proximaux localisés dans la zone cultuelle du site jusqu'aux dépôts distaux du secteur thermal. Depuis la source jusqu'aux dépôts intermédiaires (*proximal slope*) de l'aqueduc, 35 m plus en aval, le $\delta^{13}\text{C}$ des travertins augmente de 0,22 ‰ et le $\delta^{18}\text{O}$ augmente de 3,26 ‰, caractérisant un refroidissement de l'eau thermique et une certaine évaporation, provoquant un appauvrissement en isotope léger ^{16}O et, certes peu marqué, en ^{12}C . Ce phénomène se poursuit jusqu'aux dépôts distaux (*distal slope*), à 90 m en aval de la source, des salles T11, T12 et T13 et des salles T19, T20 et T23, avec une augmentation significative du $\delta^{18}\text{O}$ de 1,70 ‰ et du $\delta^{13}\text{C}$ de 1,10 ‰. Ces variations isotopiques de l'amont vers l'aval sont typiques des travertins et de leurs eaux associées, lorsque le dégazage progressif de CO_2 ainsi que le refroidissement de l'eau entraînent une perte préférentielle des molécules légères, et un enrichissement en ^{18}O et en ^{13}O croissant depuis la source. Le signal isotopique d'un cheminement amont/aval (*Vent/Proximal slope/Distal slope*) « naturel » de travertins est ainsi parfaitement caractérisé (Fig. B.47) pour l'ensemble de ces secteurs.

En revanche, la signature isotopique des dépôts distaux des salles thermales T1, T5, T9 et T15, et davantage pour les salles T4 et T6, répond différemment. Les travertins des salles T1, T5 et T9 possèdent sensiblement la même composition isotopique des dépôts de mi-pente, ce qui signifie que les phénomènes cités précédemment ne jouent très peu sur la composition isotopique et la nature de l'eau responsable de leur dépôt. Il en est de même pour les travertins de la salle T15, qui ont certes un $\delta^{13}\text{C}$ plus faibles, mais qui restent néanmoins dans la gamme des dépôts de l'aqueduc. Le signal isotopique des salles T4 et T6 s'écarte largement du dessin classique, avec des valeurs en $\delta^{13}\text{C}$ nettement négatives et des valeurs en $\delta^{18}\text{O}$ plus faibles pour T6 et plus élevées pour T4. Cela caractérise la variabilité du signal des isotopes stables dans un système travertineux anthropisé répondant à certaines variations des eaux de formation (mélanges avec une eau douce, etc.) due à une gestion anthropique complexe.

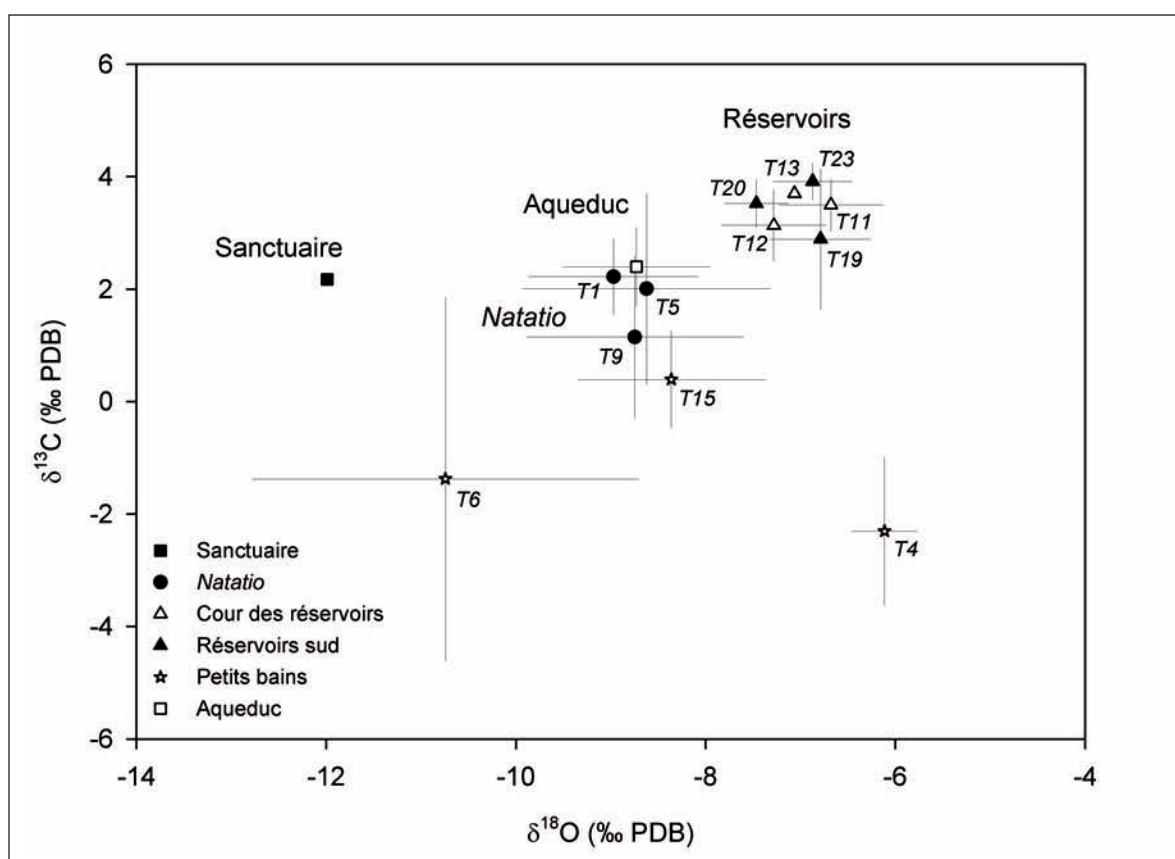


Figure B.46. Compositions isotopiques (carbone et oxygène) d'échantillons de travertin provenant de différents secteurs (notés sur le graphique) du site antique de Jebel Oust.

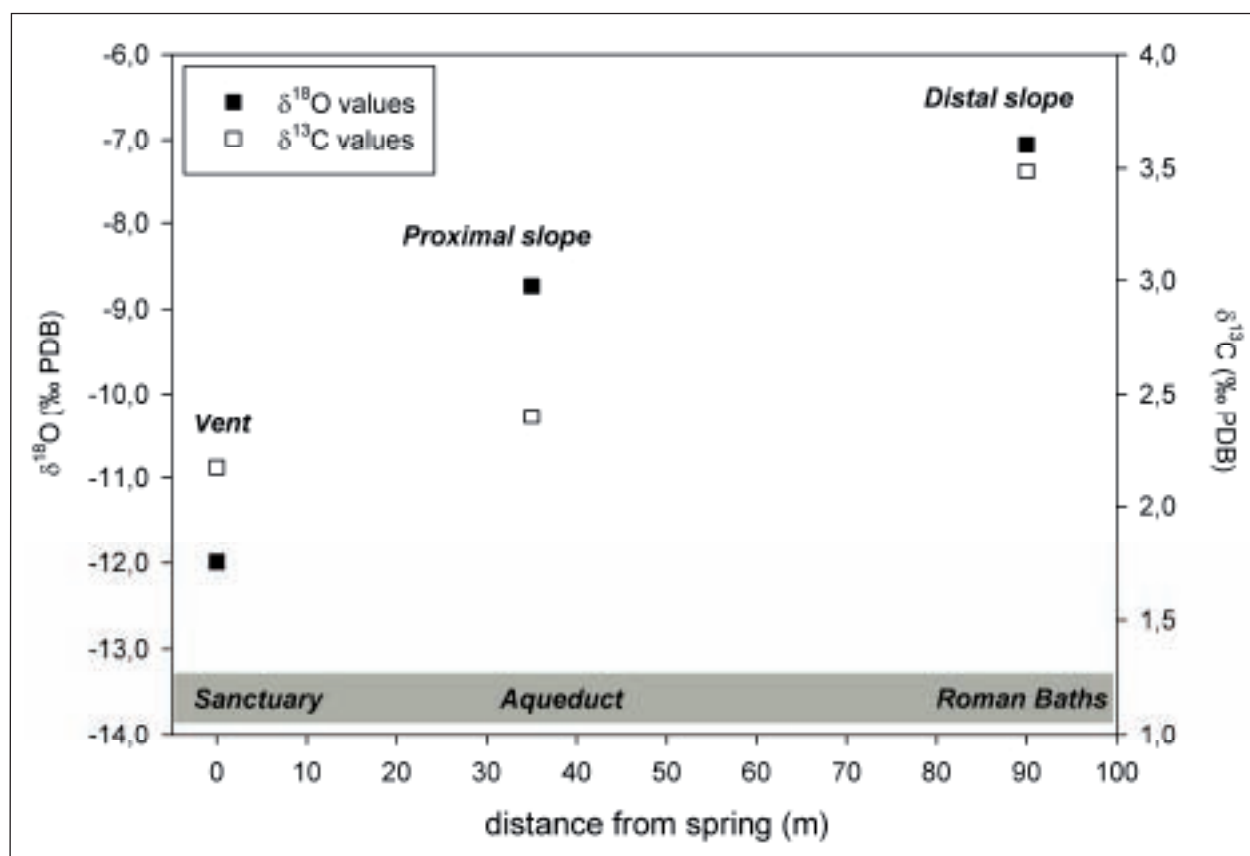


Figure B.47. Compositions isotopiques du carbone et de l'oxygène des travertins de Jebel Oust depuis la source (vent) jusqu'aux thermes (distal slope) ; voir le détail des échantillons et des données dans le texte..

B.II.3. Des travertins naturels aux *travertins anthropiques* à Jebel Oust.

Les observations de terrain effectuées tant au niveau des structures archéologiques qu'en marge de celle-ci nous ont permis de repérer les dépôts de travertin qui se sont déposés sur le versant avant l'installation humaine et l'exploitation de la source chaude, dès le premier siècle de notre ère. Ces travertins « naturels » se déposent suivant **un modèle de dépôt en pente douce**, formant **un cône de travertin** dont nous avons pu, grâce aux différents affleurements repérés sur le versant du jebel, reconstituer l'extension spatiale. Ces travertins, d'une dizaine de centimètres d'épaisseur dans la partie amont, s'épaississent vers l'aval pour atteindre plusieurs mètres de puissance à mi-versant. Leur épaisseur totale en aval nous reste encore inconnue du fait des travaux d'aménagement ultérieurs, mais sont au minimum de trois mètres de puissance.

L'étude et l'analyse des *travertins anthropiques* du site nous est rendu possible par l'exceptionnel préservation des dépôts au sein des structures hydrauliques antiques, qui naviguent, depuis le zone du captage (sanctuaire) d'une gestion relativement simple de l'eau chaude (aqueduc) à une gestion plus complexe (thermes).

Ainsi, nous identifions sur le site de Jebel Oust la transition entre les dépôts de travertins naturels, déposés lors d'une phase antérieure de l'exploitation de la source chaude, et les dépôts de *travertins anthropiques*. Cette transition, liée à l'exploitation de la source chaude à partir du premier siècle de notre ère, se traduit par le passage d'un modèle unique de dépôt de pente (Fig. B.42) à un modèle de dépôts multiples en relation avec la nature des structures humaines (Fig. B.48) et une signature géochimique (isotopes stables de l'oxygène et du carbone) décalé (modifié et complexifié) par rapport au modèle naturel. Nous avons dans l'exemple du site de Jebel Oust une image de l'impact évident de l'homme sur la sédimentation d'un versant complètement anthropisé, et ce dès le début de notre ère.

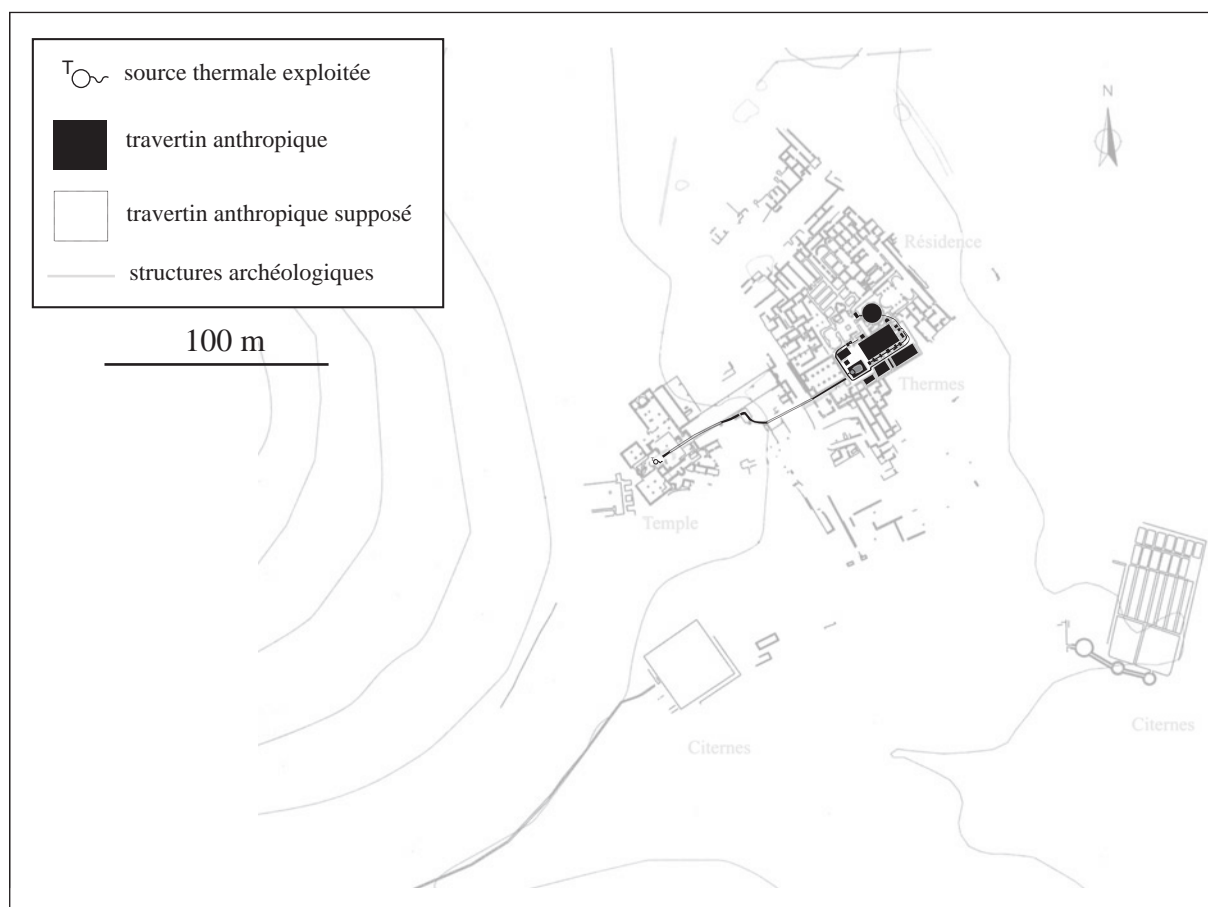


Figure B.48. Distribution spatiale des travertins anthropiques sur le versant du Jebel Oust (image de fond : plan des structures archéologiques).

B.III. LA GÉOARCHÉOLOGIE DES *TRAVERTINS ANTHROPIQUES* DU COMPLEXE LIEU DE CULTE/SOURCE CHAUDE/THERMES DU SITE ANTIQUE DE JEBEL OUST.

Nous consacrons cette partie à l'analyse géoarchéologique des *travertins anthropiques* préservés au sein des structures archéologiques du site de Jebel Oust. La présentation suivra un cheminement depuis la partie supérieure du site, c'est-à-dire la zone cultuelle et la source chaude associée, à laquelle nous intégrerons les dépôts de l'aqueduc dont nous avons pu étudier le colmatage sédimentaire dans sa partie amont et intermédiaire (à mi-pente), pour terminer par le secteur thermal situé en contrebas du site.

B.III.1. La zone cultuelle et l'aqueduc.

L'étude de la zone cultuelle et de la source chaude associée a été présentée au colloque *Agglomérations et sanctuaire, Réflexions à partir de l'exemple de Grand* qui s'est tenu à Domrémy-La-Pucelle (Vosges) en octobre 2011 et dont la publication des actes est en cours¹. Notre propos tend principalement à montrer l'intérêt d'une approche géoarchéologique à la compréhension de l'étroite et complexe relation qui lie les structures cultuelles aux manifestations de la source thermale.

B.III.1.1. Les deux niveaux de captage de la source et les deux états du sanctuaire.

Le sanctuaire romain de Jebel Oust, associé à une source chaude, présente deux états architecturaux se succédant chronologiquement et montre une certaine complexité dans son fonctionnement. En effet, les aménagements des deux états du sanctuaire antique, tels qu'ils sont visibles actuellement sont organisés autour et au-dessus d'un large trou dont l'ouverture occupe toute la surface de la *cella* du premier temple ; la *cella* du second temple a été installée plus à l'ouest et de ce fait, la *cella* du premier temple s'est retrouvée enfouie sous les remblais du *pronaos* du second état du temple. Actuellement, le site présente un large trou qui correspond au déblaiement d'un « puits d'accès » à une cavité souterraine dont nous caractériserons la morphologie.

L'analyse géoarchéologique et stratigraphique a permis de repérer deux niveaux de sortie de l'eau thermale, que l'on peut relier topographiquement et chronologiquement aux deux états de construction du sanctuaire. Un premier niveau de captage, situé à une altitude proche de 130 m et dont les vestiges restent minimes du fait des aménagements postérieurs, serait contemporain de la première phase du sanctuaire. Un second niveau de captage, plus profond, localisé à l'altitude moyenne de 124 m, présente un aménagement plus complexe et est à mettre en relation avec le second état du sanctuaire, correspondant à une phase de monumentalisation architecturale de la zone cultuelle.

¹ Curie et al. (2011) : J. Curie, C. Petit, A. Ben Abed et J. Scheid : *Etude géoarchéologique d'un lieu de culte implanté sur une source thermale : le sanctuaire de Jebel Oust (Tunisie)*, soumis.

B.III.1.1.1. Un premier captage : le niveau supérieur.

La *cella* du temple 1 a été positionnée exactement à l'aplomb de la source thermique bien que la géométrie de son exutoire ne puisse pas être reconstituée parfaitement du fait des aménagements postérieurs. Quelques observations permettent cependant d'appréhender correctement ce premier niveau de sortie de l'eau thermique. Le niveau de base de sortie de l'eau thermique lors de ce premier état (premier captage associé au premier état du sanctuaire, Fig. B.49) se situe à l'altitude moyenne de 129, 81 m. Trois profils topographiques, d'orientation grossièrement nord-sud, ont pu être relevés dans l'espace réduit qui subsiste de ce premier état de captage (profils 8, 9 et 10, Fig. B.50), immédiatement en aval du baptistère paléochrétien mis en place lors de la troisième phase chronologique du sanctuaire.



Figure B.49. Le premier captage antique de la source chaude de Jebel Oust.

Le petit réseau de conduites (profil 9), repéré en arrière du mur de la *cella* 1 et immédiatement à l'est du baptistère, a été creusé dans le substrat (brèche), certainement dans l'ambition de faciliter l'écoulement des eaux. Ces conduites, peu profondes étaient probablement souterraines, mais les aménagements postérieurs nous empêchent de se prononcer davantage à ce sujet ; un dispositif de couverture de cette échancrure est probable mais reste hypothétique. Seul un vestige de maçonnerie subsiste au centre de la structure (profil 10) ressemblant à un plot de 20 cm de hauteur, ainsi qu'un petit muret dans l'angle nord-ouest de ce premier puits. La fonction de ces vestiges nous reste inconnue. Représentent-ils les uniques vestiges d'une ancienne canalisation ? Le plot formait-il l'appui d'une statue, d'une colonne ou d'un pilier ? Cette base servait-elle de point d'appui pour faciliter l'accès au puits pour un entretien des structures hydrauliques ? Considérant sa position, au sein même du captage et des structures centrales d'écoulement de l'eau thermique, nous favorisons ici préférentiellement cette dernière.

La partie la plus en aval de ce premier captage présente une large échancrure en V (profil 8), creusée dans le substrat (brèche et travertin naturel déposé avant l'occupation humaine), à la même altitude que les petits canaux situés plus en amont. D'une largeur voisine de 30 cm à sa base, cette ouverture en V creusée dans le rocher présente une ouverture de 1,21 m à son sommet, au niveau de l'arasement du substrat brèche sur la paroi nord. C'est à travers cette échancrure que devait s'écouler l'eau thermale, avant d'être acheminée à l'intérieur d'une canalisation, dont le tracé, la morphologie et la nature nous restent inconnus du fait des aménagements antiques postérieurs.

Les quelques structures observées à cet endroit de la zone cultuelle sont les seuls vestiges témoignant du premier captage de l'eau thermale, à une altitude relativement haute (base du captage : 129,81 m). Les grands travaux postérieurs correspondant à la monumentalisation du sanctuaire ont effacé les portions les plus en aval de l'aménagement hydraulique du premier état dont les vestiges sont modestes, mal conservés et en partie détruits par les aménagements ultérieurs.

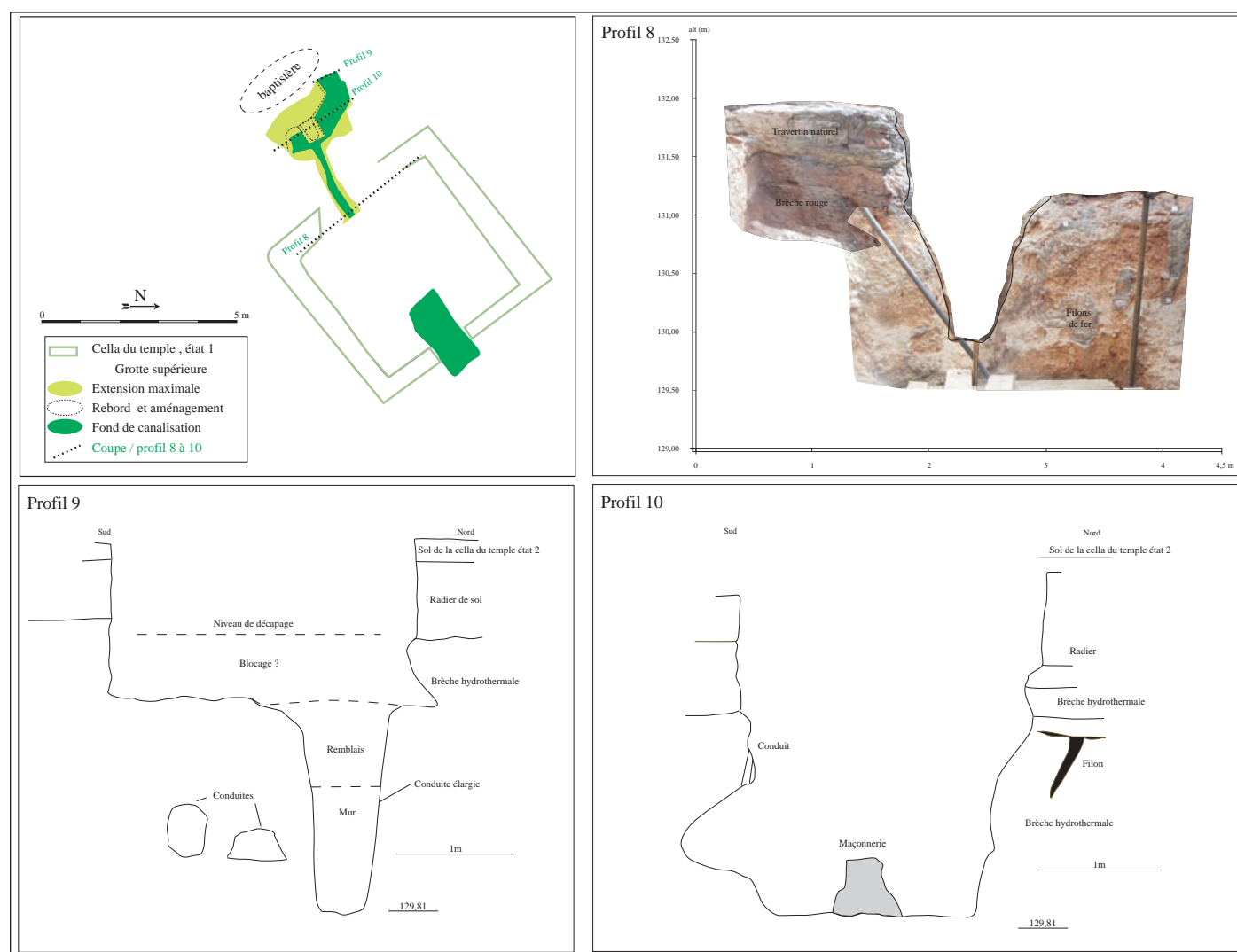


Figure B.50. Plan du captage supérieur de la source chaude antique (premier captage) et profils topographiques associés.

B.III.1.1.2. Un second captage : la grotte et les conduites inférieures.

Un réaménagement du lieu de culte se produisit au cours de la seconde moitié du II^e siècle de notre ère (Ben Abed et Scheid, 2005) et est caractérisé par le creusement d'un deuxième puits de captage de l'eau thermale (Fig. B.51), immédiatement à l'est du premier. Ce puits, creusé au centre de la *cella* du temple de l'état 1, donne accès à un réseau de galeries qui se développe vers l'ouest sur près de 10 m de long à une cote voisine de 124 m, soit près de 9 m sous le sol de la *cella* du temple du deuxième état.



Figure B.51. Le second captage antique de la source de Jebel Oust.

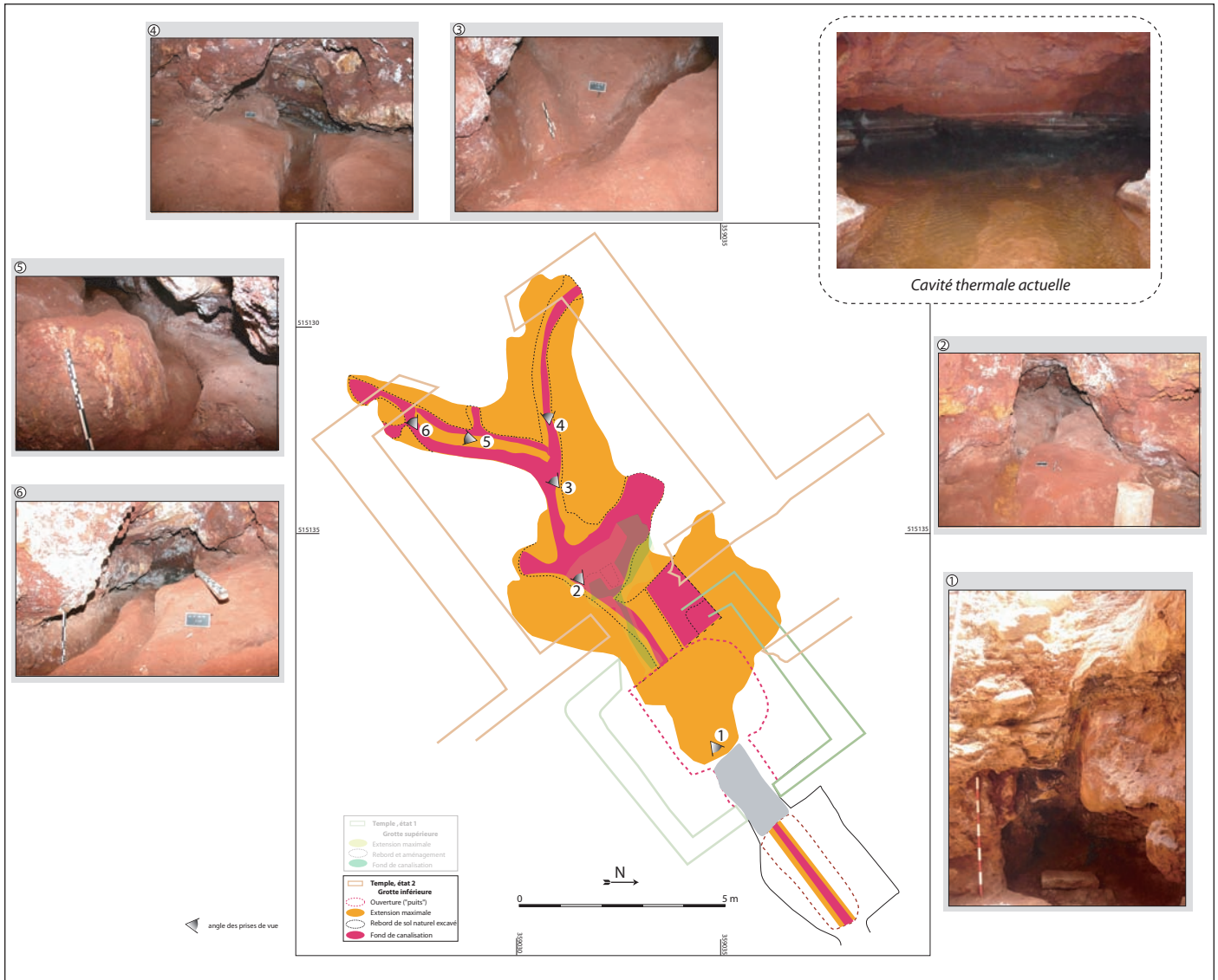
• En amont, un réseau digité :

Le réseau souterrain est digité en plusieurs galeries qui ont fait l'objet de relevés lors de l'exploration de la grotte hydrothermale. La réalisation de profils topographiques (Fig. B.52) permet de rendre compte de la morphologie particulière de cette cavité hydrothermale. Les deux plus longues galeries, celle qui part en direction du sud (profils 3 et 4) et celle qui part vers l'ouest (profil 5), atteignent 5 m de longueur avant de converger au niveau d'une salle plus large (profils 1 et 2) située juste en amont du « puits d'accès ». La morphologie de chacune des galeries est irrégulière, globalement ovalaire ou en dôme, et à plafond la plupart du temps plat. Le diamètre de ces galeries varie fortement, passant de près de 2 m dans les parties les plus en aval (profil 2) à moins de 1 m dans la partie amont de la grotte (profils 3, 4 et 5).

Sur les parois de la grotte, comme au plafond, croissent des croûtes de minéralisations, essentiellement ferrugineuses, ainsi que quelques stalactites carbonatées et ferrugineuses. Le colmatage partiel de la grotte montre clairement des films de précipitations de sels intercalés au sein d'une masse d'argile rouge. Le plancher de la grotte thermale, situé à une cote moyenne de 124 m, correspond à un inter banc repéré dans la masse de brèche hydrothermale constituant le substrat géologique de cette grotte. Ce niveau représente très probablement un des niveaux naturels de sortie de l'aquifère profond (thermal) du système géothermal régional.

Le plancher naturel de la grotte est entaillé par un réseau convergeant vers la sortie (vers l'aval) de petits canaux clairement artificiels drainant les eaux souterraines qui sourdaient en plusieurs endroits de la grotte (Fig. B.53). Ces canaux présentent une section en U d'une largeur moyenne de 20 cm et d'une profondeur variable de 20 à 30 cm, et sont caractérisés par une pente quasi-nulle. Ces structures permettaient certainement le maintien d'un niveau d'eau relativement constant à une cote voisine de 124 m, et permettaient un écoulement continu des eaux thermales lors des périodes d'étéage.

Ces structures antiques sont en tout point semblables aux canaux creusés dans la grotte actuelle et témoignent de la virtuosité des ingénieurs romains dans la gestion de la source thermique antique et d'une connaissance de son fonctionnement, tout du moins de façon empirique par l'observation des variations hydrostatiques de l'aquifère thermal dans la grotte. De manière plus générale, l'ingénierie hydrogéologique perçue ici à Jebel Oust est à rapprocher de celle qui a pu être mise en évidence sur le sanctuaire gallo-romain de Villards d'Héria (Jura, France) (Nouvel, 2011). Ces aménagements anthropiques repérés à l'intérieur de la grotte hydrothermale sont les témoins de l'ingéniosité des romains à l'exploitation et à la gestion d'une source thermique, dont le fonctionnement demeure le point crucial et primordial de l'implantation humaine à Jebel Oust.



- **En aval, une salle élargie et le départ de l'aqueduc :**

Un examen géoarchéologique au fond du puits d'accès à la grotte mais également sur les parois du puits d'accès complète nos observations et permet ainsi de mieux comprendre les aménagements et le fonctionnement de la source thermale et de son captage lors de la phase 2 du temple.

Le secteur aval de la grotte, c.-à-d. directement à l'aplomb du puits d'accès, a été fouillé afin de pouvoir observer les lambeaux du remplissage sédimentaire au départ immédiat de la grande canalisation, épargné par les fouilles antérieures de M. Fendri. La première couche consiste en un niveau de sédiments sablo-graveleux sombre, de 80 cm de puissance, avec la présence de matériel en matière plastique témoignant des fouilles de M. Fendri. Sous ce remblai de fouilles, nous avons trouvé un niveau de sédiments argileux sombres mêlés à des oxydes jaunâtres, d'une puissance d'environ 15 cm, et recouvrant le fond de la canalisation. Ce niveau correspond au niveau situé en base de séquence sédimentaire de la coupe C1 située 2 m plus en aval (cf. *infra*).

Le fond de la canalisation, dont le plan est présenté (Fig. B.54), est creusé dans le substrat rocheux (qui se présente ici sous la forme d'oxydes ferreux massifs et lités), formant une rigole en forme de U qui est la continuité des canaux observés dans le secteur amont de la grotte et dont la présence s'explique très certainement par la volonté de préserver un écoulement régulier des eaux thermales en période de sécheresse.

Le fond et les parois de cette rigole en U sont revêtus, dans ce secteur, par une feuille de plomb. Nous pouvons ainsi définir le niveau minimal du second captage antique (lié à la phase 2 du sanctuaire romain), situé à l'altitude de 124,21 m. Cette cote constitue ainsi le point topographique d'origine du système hydraulique qui se développe en aval, en particulier du fonctionnement hydraulique du complexe thermal antique. Afin de caractériser la particularité de ce captage antique, deux profils ont été réalisés le long de cette conduite revêtue de plomb, montrant la morphologie particulière du système hydraulique et l'érosion subie par la feuille de plomb depuis 2000 ans (fig. B.55).

L'installation du revêtement de plomb, retrouvé exclusivement dans la partie aval de la grotte¹, traduit probablement la volonté d'obtenir une eau plus « claire » car moins chargée en sédiments arrachés au substrat. La présence de cette feuille de plomb peut également témoigner d'un repère de fond de canalisation, mis en place à des fins d'entretien de cette canalisation en U, rendant les curages plus aisés, avec une efficacité accrue.

¹La présence de plomb au sein d'un réseau hydraulique n'est pas surprenante. Son absence dans les canaux du secteur amont de la grotte thermale pourrait s'expliquer par sa récupération lors de l'abandon du site ou de son enlèvement lors des fouilles de M. Fendri.

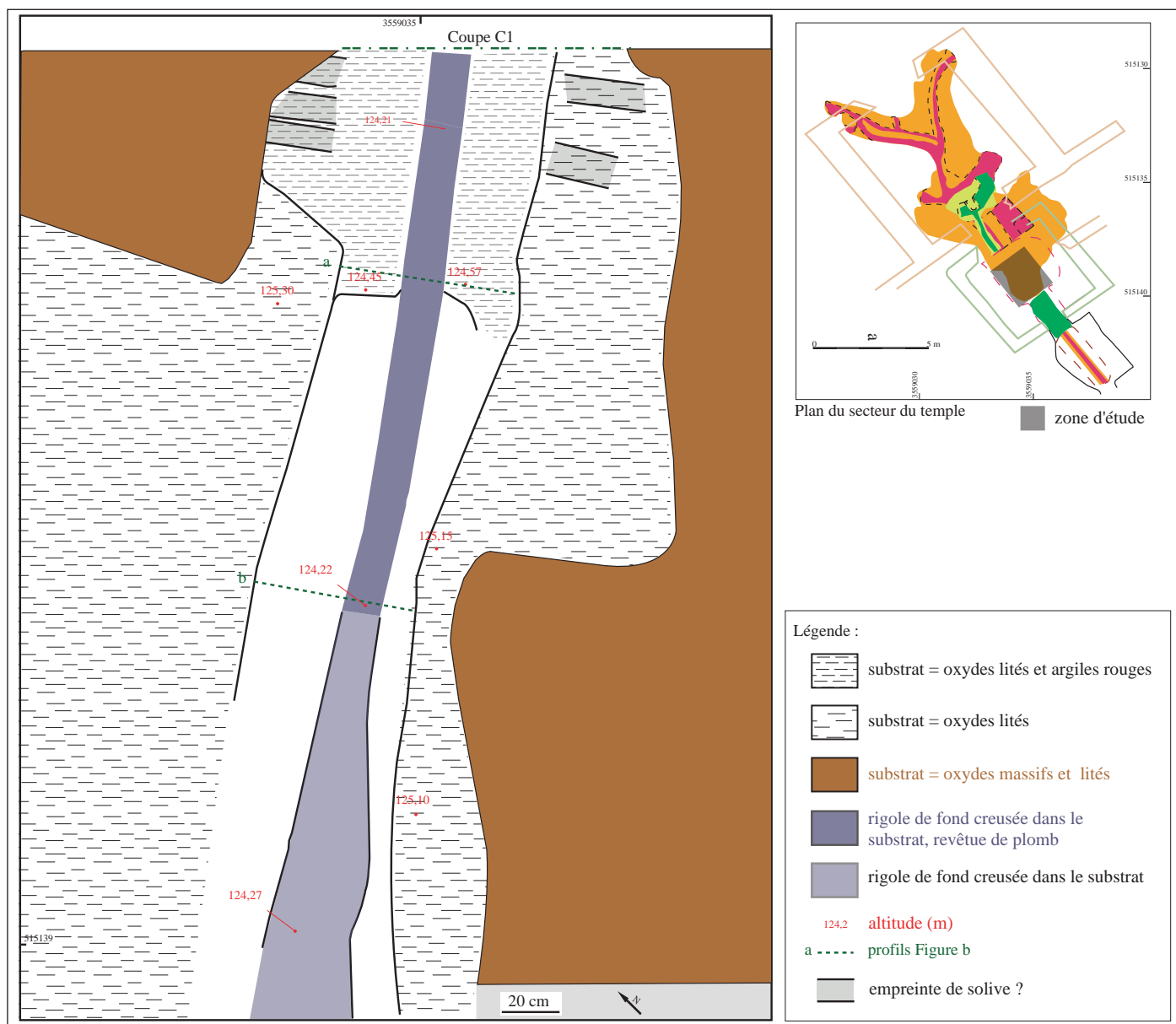


Figure B.54. Plan du secteur aval de la grotte hydrothermale (relevé : J. Curie et H. Broise).

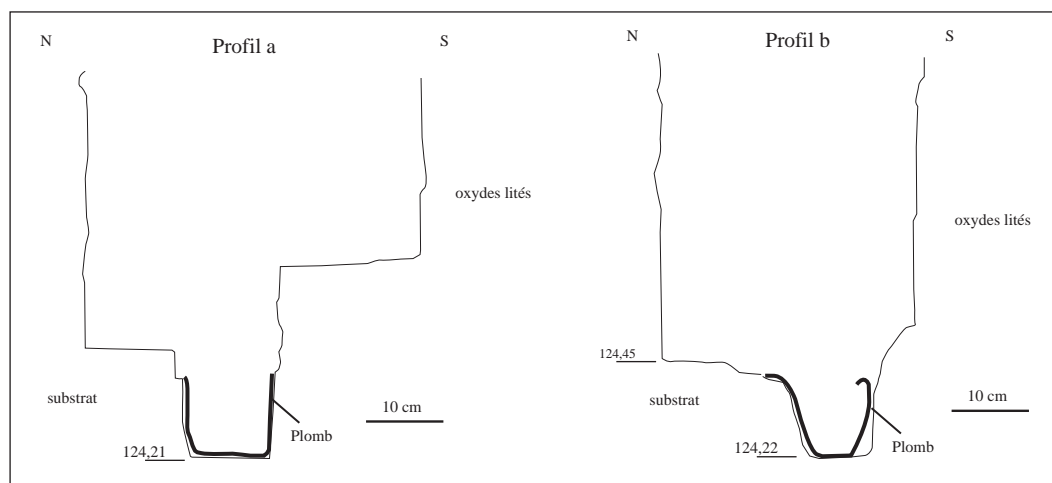


Figure B.55. Profils transversaux de la rigole revêtue de plomb (situation des profils a et b, voir Fig. B.54).

Nous avons également pu mettre au jour des petites structures en creux présentes dans le substrat d'oxydes lités, immédiatement en amont de la coupe C1. Leur largeur varie de 8 cm pour la plus petite à 15 cm pour la plus large. Ces structures se font face de chaque côté de la grande canalisation. Deux interprétations archéologiques peuvent être émises pour expliquer la présence de ces structures. Celles-ci, creuses et de section rectangulaire (L=20 ; l=7,5 ; h=5 cm), ressemblent étrangement à des déversoirs naturels secondaires se jetant dans la large canalisation. Cependant, une seconde interprétation, qui a notre préférence, serait de voir en ces structures un aménagement anthropique. Ces structures pourraient être les vestiges d'un système d'ancrage pour des solives recouvrant la conduite creusée dans le plancher de la grotte. Ce plancher hypothétique recouvrirait la conduite hydrothermale et permettrait l'accès à cet endroit pour un entretien éventuel de la grotte hydrothermale et de la conduite d'eau chaude. Cette seconde hypothèse nécessiterait la présence d'un chemin d'accès depuis la surface jusqu'au plancher de la grotte, chemin dont les vestiges font encore, à l'avancée actuelle de nos travaux de terrain, défaut. Nous ne pouvons oublier un second chemin d'accès possible à la cavité thermale, qui est l'emprunt du tracé de l'aqueduc depuis l'aval mais dont aucune preuve archéologique ne peut encore confirmer.

L'observation de la nature des précipitations dans le puits apporte de précieux renseignements concernant l'aménagement de ce dernier ainsi que sur son fonctionnement. Si dans le réseau de galeries de la grotte inférieure, seules des précipitations ferreuses (de couleur rouge à orange intense) sont visibles, des concrétions calcaires apparaissent sur les parois du puits d'accès (profil 6), atteignant la cote de 128,95 m. Ces précipitations recouvrent la partie inférieure des parois du puits, épargnées par des travaux d'élargissement bien visible à un niveau supérieur. L'extension latérale de ces précipitations carbonatées est nettement visible et correspond aux dépôts de lamines de précipitations carbonatées observées dans la grande coupe sédimentaire colmatant le départ de l'aqueduc (UF 2797/1 de la coupe C1, cf. *infra*). Nous proposons de traduire ces deux épisodes de précipitation sédimentaire différents par la succession de deux conditions de dépôt différentes dans le puits, liées à des environnements de dépôt différents. Le dépôt de précipitations ferrugineuses a lieu dans un milieu fermé, sans oxygénation du milieu et sans phénomène d'évaporation et de dégazage. A l'inverse, la précipitation des carbonates s'effectue lors d'une certaine ouverture du milieu entraînant la perte en CO₂ présent dans l'eau par dégazage et favorisant ainsi la précipitation des carbonates et la formation d'un véritable dépôt de travertin.

La relation de ces deux environnements de dépôt avec les aménagements anthropiques et les arguments archéologiques du phasage chronologique de la zone cultuelle apparaît alors évidente. Les conditions de dépôt des précipitations ferrugineuses, en milieu fermé, sont une preuve de l'absence de visibilité de l'eau thermale lors de la phase 2 du sanctuaire. Le puits était alors « recouvert » par l'escalier et le *pronaos*, dont les fondations étaient soutenues par une voûte dont nous avons les vestiges encore visibles sur les parois du puits, lors de l'état 2 du sanctuaire. Des conditions identiques se retrouvent dans la cavité thermale actuelle, où exclusivement se déposent, sur le sol et les parois de la grotte, des précipitations ferrugineuses (en plus des quelques dépôts superficiels de croûtes et stalactites de sel).

Dans la partie supérieure du puits, plaqués sur les parois aménagées en banquette à cet endroit, subsistent sur les parois nord et sud, à la cote 130,06 m, les vestiges d'un départ de voûte (profil 6). Cette voûte, qui surplombait le puits thermal lors du second état du sanctuaire s'est probablement effondrée, ainsi que l'ensemble des éléments architecturaux qui la surmontaient, dans le large trou lorsque la *cella* du temple 2 n'était plus fonctionnelle, suite à l'abandon du lieu de culte romain.

B.III.1.2. L'aqueduc depuis la zone cultuelle/source jusqu'aux thermes.

Trois coupes du colmatage sédimentaire de l'aqueduc, depuis son départ au niveau de la cavité hydrothermale et du sanctuaire associé jusqu'à mi-pente, ont pu être étudiées : les coupes C1, C2 et C3 (Fig. B.56).

B.III.1.2.1. Le départ de l'aqueduc : la coupe sédimentaire C1.

Dans la partie aval de la cavité hydrothermale, le profond aqueduc, alimentant en eau chaude les thermes en contrebas, prend naissance. Nous voyons distinctement, malgré le colmatage sédimentaire postérieur à sa construction, l'entaille consécutive à son creusement dans le substrat géologique à certains endroits, à la base et partiellement sur la paroi sud. L'étude de la coupe du colmatage sédimentaire de cet aqueduc, au niveau de son départ strict (coupe C1), montre une série de dépôts nous permettant de reconstituer partiellement, si ce n'est totalement, son histoire.

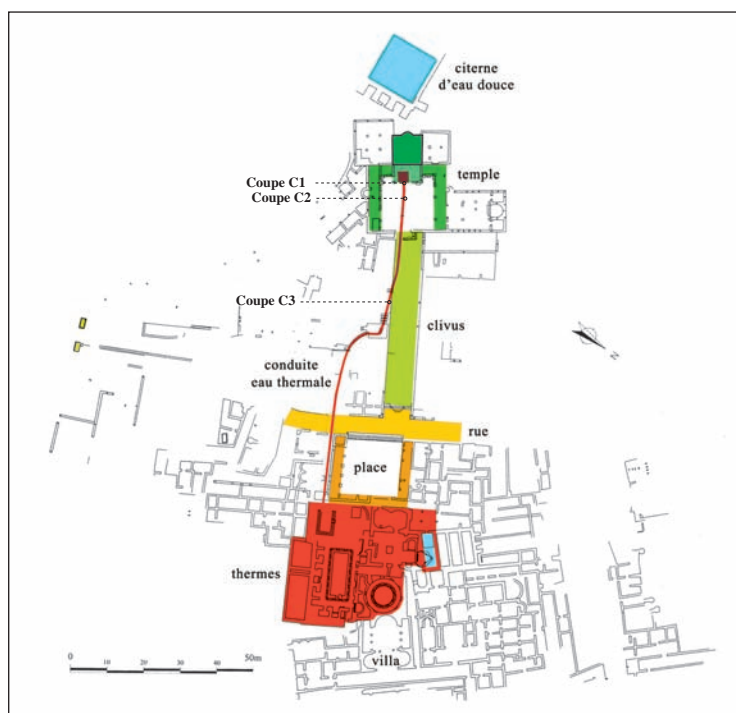


Figure B.56. Localisation des coupes C1, C2 et C3 sur le plan du site antique de Jebel Oust.

• **Description de la coupe C1 (Fig. B.57) :**

La coupe C1 présente une séquence sédimentaire de près de 5 m de puissance, correspondant au colmatage sédimentaire de la grande canalisation qui acheminait l'eau thermale jusqu'aux thermes.

En bas de séquence, dans la canalisation creusée directement dans le substrat, nous observons un remplissage essentiellement d'oxydes et d'argiles, avec successivement de bas en haut :

- des oxydes jaunes (goethite) et des argiles bruns en fond de canalisation, sur environ 30 cm d'épaisseur (UF 2791/1) ;
- un niveau d'oxydes rouges (hématite) mêlés à de l'argile rouge et quelque passes carbonatées, de 40 cm d'épaisseur (UF 2792/1) ;

puis, nous observons des dépôts issus de la précipitation de sédiments engendrés par la source thermale :

- un niveau de précipitation ferrugineuse, à lamines très rouges et assez friables, et quelques dépôts d'oxydes de fer entremêlés (UF 2796/1) sur une épaisseur moyenne de 1 m ;
- une précipitation à lamines pluri-centimétriques de carbonates, formant des épaulements sur les deux parois latérales de la canalisation, jusqu'à la cote maximale de 128,90 m (UF 2797/1) ;

Enfin, nous observons en fin de séquence une modification fondamentale de la sédimentation avec :

- un puissant niveau de sédiments exclusivement détritiques, caractérisé par la présence de gros blocs, de cailloux et une fraction sablo-argileuse, ainsi qu'un bloc isolé de brèche hydrothermale surmontant l'ensemble de la série (UF 2798/1).

• **Interprétation de la coupe C1 :**

L'analyse de la coupe sédimentaire C1 nous permet de distinguer deux grandes phases de colmatage de la conduite. Une première, comprenant des dépôts des oxydes de fer, des argiles, et des précipitations carbonatées et ferrugineuses, correspond à une phase de fonctionnement de la source thermale. Les précipitations carbonatées recouvrant les parois de la canalisation correspondent aux précipitations carbonatées recouvrant les parois du puits d'accès et sont les témoins de la dernière phase de fonctionnement de la source thermale.

Un second épisode sédimentaire représente ensuite une phase de tarissement de la source thermique, marquée par la puissante séquence détritique dans la partie supérieure. Les blocs de ce niveau sont certainement des blocs effondrés des constructions humaines (couverture de l'aqueduc, blocs de murs de construction du sanctuaire), entremêlés à des dépôts de colluvions mis en places lors d'épisodes orageux .

Nous allons voir (cf. B.III.1.2.2 et B.III.1.2.3) que nous retrouvons également l'enregistrement sédimentaire de cette phase de tarissement de la source thermique dans les coupes du colmatage de l'aqueduc situées plus en aval, dans les secteurs S18 (coupe C2, 5 m plus en aval) et S20 (coupe C3, située à mi-pente de l'aqueduc).

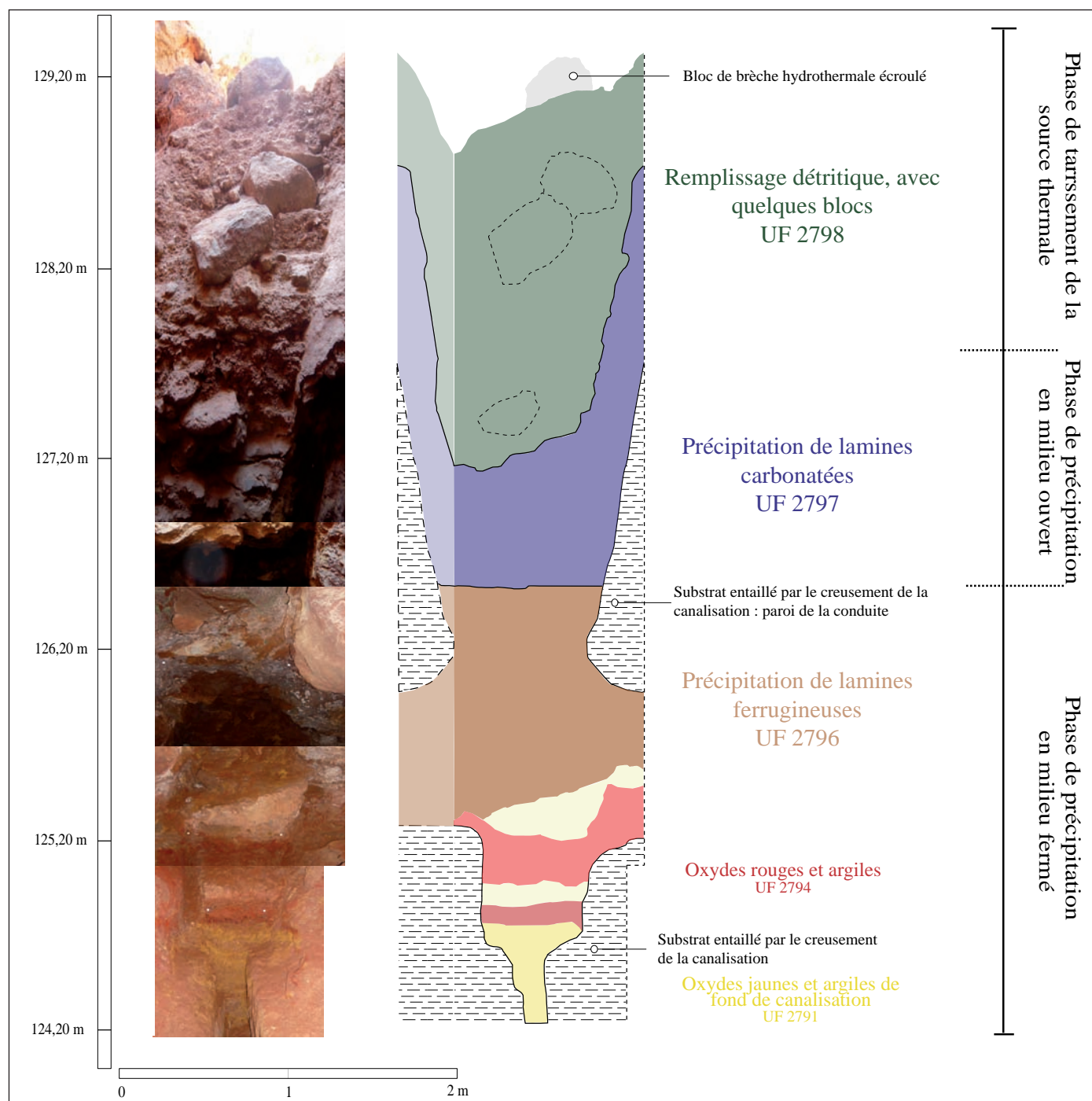


Figure B.57. Description et interprétation géoarchéologique de la coupe C1 du colmatage sédimentaire de l'aqueduc thermal de Jebel Oust ; voir les commentaires dans le texte.

B.III.1.2.2. Un colmatage semblable 5 m plus en aval du départ de l'aqueduc, dans la coupe C2.

Le remplissage sédimentaire de l'aqueduc a pu être observé 5 m plus en aval par rapport à son départ, dans le secteur S18 de la zone du sanctuaire où chemine la canalisation thermique (Fig. B.58). L'accès à cette portion de l'aqueduc a été rendu possible par les travaux antérieurs réalisés lors des fouilles de M. Fendri, au cours des années 1960. La coupe de colmatage de l'aqueduc à cet endroit, la coupe C2, a pu être relevée et étudiée et présente certaines caractéristiques fondamentales dans notre compréhension de l'histoire et du fonctionnement de la canalisation d'eau thermique.



Figure B.58. Vue zénithale de la canalisation thermique dans le secteur S18 de Jebel Oust.

• Description de la coupe C2 (Fig. B.60):

Depuis le fond de la conduite, situé à la cote de 124,25 m, jusqu'à la cote 131 m correspondant à la base de l'empreinte des dalles de couverture de surface de l'aqueduc, nous observons plusieurs épisodes de sédimentation différents :

- des oxydes jaunes (Goethite, UF 2791/2) et rouges (hématite, UF 2792/2), équivalentes aux UF 2791/1 et 2792/1 de la coupe C1. Dans ce niveau, nous avons pu observer un tesson (Fig. B.59) qui s'est retrouvé piégé dans les sédiments ;



Figure B.59. Fragment en céramique encroûté dans les niveaux d'oxydes de la canalisation.

- un niveau de précipitation de lamines ferrugineuses très grossières, formant des épaulements sur la paroi jusqu'à la cote de 126,86 m (UF 2796/2, équivalant à l'UF 2796/1 de la coupe C1), mêlées à quelques dépôts d'oxydes de fer. Certaines lamines sont tronquées au centre de la coupe ; ceci est probablement dû aux travaux antérieurs effectués dans ce secteur ;

- un niveau de précipitations de laminées carbonatées grossières et s'amincissant vers le centre de la coupe, et formant des épaulements sur les parois de la canalisation jusqu'à la cote de 128,25 m (UF 2797/2, correspondant à l'UF 2797/1 de la coupe C1). A l'intérieur de ce niveau se démarque un banc de précipitation carbonatée compact de couleur claire et blanchâtre, ainsi que deux petites poches lenticulaires de mortiers ;

- une puissante séquence de sédiments exclusivement détritiques, sablo-graveleux d'environ 3 m d'épaisseur, incluant quelques blocs (UF 2798/2, correspondant à l'UF 2798/1 de la coupe C1).

• **Interprétation de la coupe C2 :**

La séquence sédimentaire occupant le niveau inférieur de la coupe C2, jusqu'à la cote de 128,25 m et dans laquelle nous observons un remplissage de concrétions ferrugineuses (UF 2796/2) et de travertins carbonatés (UF 2797/2) représente une phase de fonctionnement de la source thermique, une période pendant laquelle l'eau thermique circulait dans la canalisation, déposant ainsi des sédiments précipités. Deux types d'encroûtements sont visibles ici, d'abord un premier niveau de concrétions ferrugineuses (UF 2796/2), puis un second ensemble de concrétions essentiellement carbonatées (UF 2797/2) grossièrement laminées. Cette variation dans la nature des précipitations peut traduire soit un phénomène naturel de variation de régime de la source thermique, soit un aménagement différent de l'évent de cette source. La présence de deux fines poches de mortier, visibles au-dessus d'un bloc de carbonates compact traduit une phase d'entretien et de réfection, au moins partiellement, du fond de la canalisation.

La série relativement détritique (graviers, quelques cailloux) mais également concrétionnée/indurée reflète probablement l'eau thermique continuant de circuler dans la canalisation qui est alors (partiellement du moins) ouverte, comme en témoigne la présence de la dalle de couverture effondrée et piégée dans cette séquence.

Le remplissage supérieur de cette coupe, à partir de la cote 128,25 m, correspond à une série d'environ 3 m de puissance de sédiments sablo-graveleux, qui sont des apports exclusivement détritiques issus du ruissellement de surface aux abords de la canalisation. Cette séquence supérieure témoigne d'une phase de dysfonctionnement de la source thermique au cours de son tarissement et/ou de ruissellements de surface s'engouffrant dans la canalisation alors partiellement ouverte.

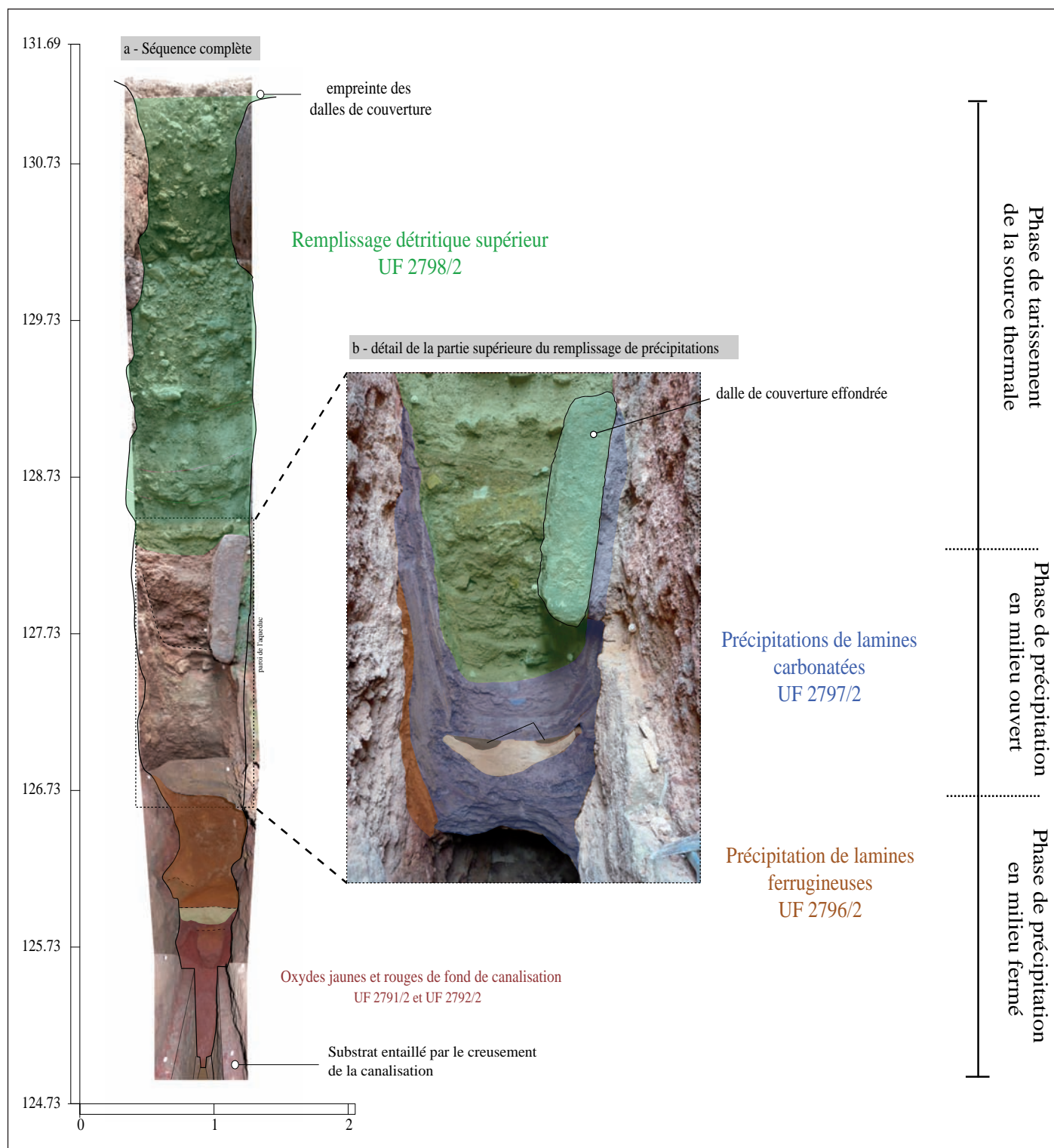


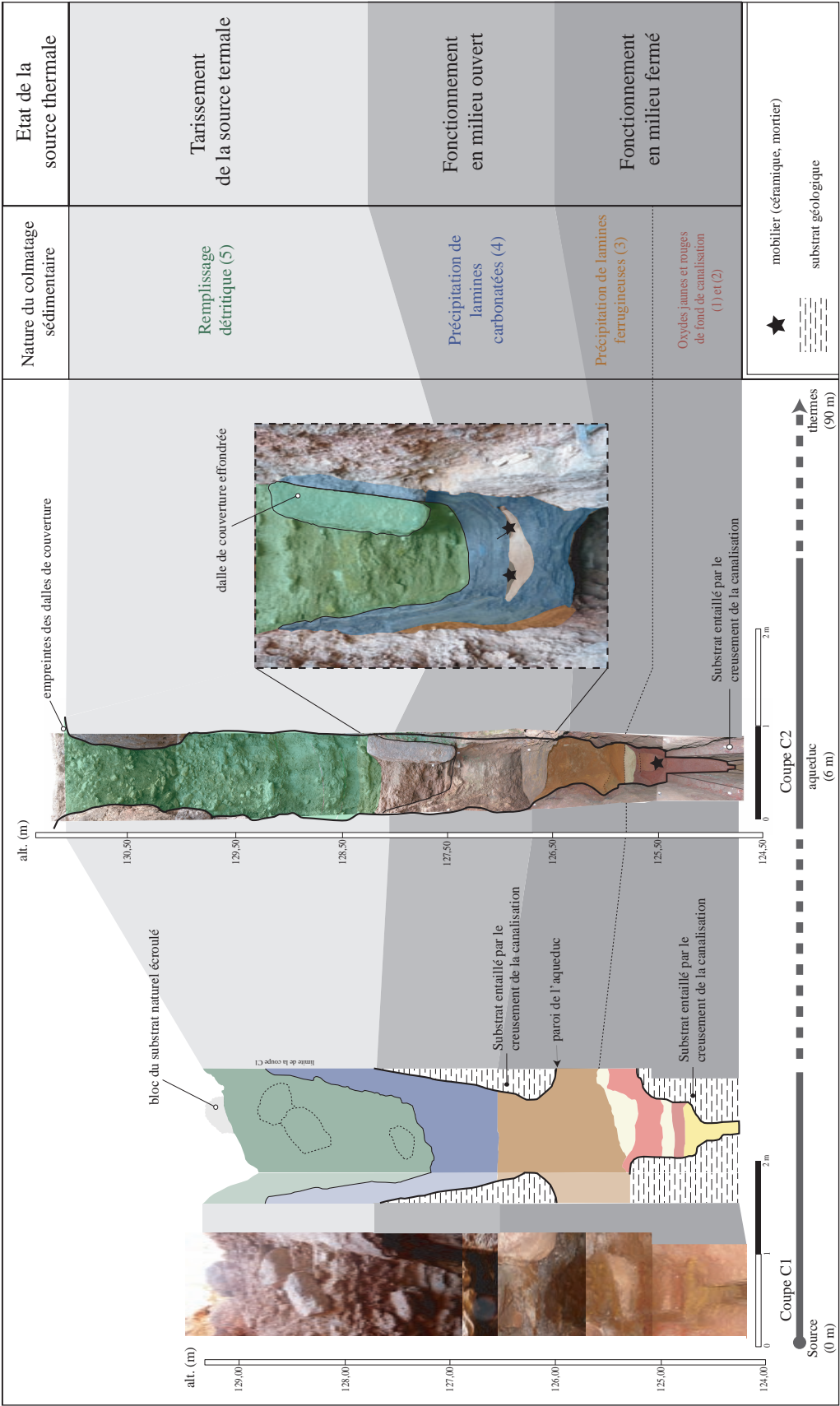
Figure B.60. Description et interprétation géoarchéologique de la coupe C2 du colmatage sédimentaire de l'aqueduc thermal de Jebel Oust ; voir les commentaires dans le texte.

Conclusion de l'analyse géoarchéologique des coupes sédimentaires C1 et C2 :

La lecture des coupes sédimentaires de colmatage de la canalisation dans sa partie amont (secteurs S1 et S18), au niveau de son départ depuis la cavité hydrothermale, permet une interprétation géoarchéologique du remplissage et du fonctionnement de cet aqueduc (Fig. B.61).

Deux grandes phases sédimentaires ont pu être mises en évidence, une première phase de sédiments précipités liée au fonctionnement de la source chaude, et une seconde constituée de sédiments exclusivement détritiques liée à la phase tarissement de la source chaude.

De plus, au sein de la première phase sédimentaire, correspondant à la phase de fonctionnement de la source thermale, deux épisodes de dépôt ont pu être caractérisés, l'un lié à une phase de non-visibilité de l'eau dans la zone cultuelle (milieu de sédimentation fermé), la seconde liée à une phase postérieure d'ouverture du milieu de sédimentation.



B.III.1.2.3. A mi-pente, un colmatage sédimentaire en *puff pastry* : la coupe C3.

A mi-chemin, environ, entre la zone cultuelle et l'édifice thermal, au niveau du secteur S20, la largeur de l'aqueduc acheminant l'eau thermale demeure constante autour de 80 cm. L'aqueduc est ouvert dans ce secteur sur environ 3,70 m de long.

Dans la partie est (aval) du secteur S20, la canalisation est couverte par quatre énormes dalles (cf. Fig. B.19) construites en travertin et qui semblent être en place. La première ($l = 0,51$ et $L = 1,5$ m), bien équarrie, présente sur sa face supérieure un plaquage de mortier qui permet de restituer une élévation plus élevée du mur délimitant le secteur S20 du *clivus* (mur 900). La seconde dalle présente une cassure qui la scinde en deux et dont la partie nord a été légèrement déplacée, et mesure 1,60 m de long pour une largeur de 0,54 m. La troisième dalle, de même dimension et également cassée en son milieu, semble être restée en place mais a été déchaussée du mur bordant le *clivus*. La quatrième dalle mesure 2,05 m de long pour 0,50 m de large et est accolée au mur du *clivus*. L'alignement du bord sud des ces quatre dalles est très approximatif et leur extrémité semble enchâssée dans un massif de travertin pré-antique. L'alignement de leur bord septentrional est également irrégulier, selon si elles ont été déplacées ou non (volontairement ou non), mais ces dalles semblent être nettement en relation avec le parement du mur délimitant le secteur S20 des structures présentes sur la pente (= le *clivus*).

Au niveau d'un large trou, d'une longueur de 3,70 m et certainement percé lors des travaux de M. Fendri, les dalles de couverture de l'aqueduc ont été retirées et rejetées immédiatement sur la berme sud, lors des fouilles anciennes. Les trois dalles concernées sont de grande taille : la dalle 766 ($1,75 \times 0,52 \times 0,21$ m), la dalle 767 ($1,62 \times 0,53 \times 0,22$ m) et la dalle 768 ($1,98 \times 0,52 \times 0,25$ m). L'agencement des bordures méridionales des dalles soulevées ne peut pas être étudié car les fouilles de M. Fendri ont fait disparaître leurs calages. En revanche, l'étude de l'espace au nord de l'emplacement initial de ces dalles montre clairement le parement sud d'un mur accolé au mur 900. Cette anomalie dans l'alignement des murs s'explique par la divergence entre l'orientation du mur 900 et le bord de la canalisation creusée dans la roche. Si les quatre premières dalles, c.-à-d. les dalles les plus à l'est, sont accolées et liées au parement du mur 900, les suivantes à l'ouest ne peuvent pas l'être car elles ne reposeraient que sur une banquette de moins de 20 cm de large ; l'alignement des dalles a donc été reporté vers le nord d'environ 50 cm, ces dalles se trouvant alors en fondation du mur 900.

Le « trou de fouille » présent dans le secteur S20, large d'environ 1 m et profond de 5 m, a été vidé des remblais des fouilles de M. Fendri, ce qui a permis de mettre au jour la coupe de remplissage sédimentaire de la canalisation (coupe C3) que nous avons pu relever et étudier.

Description de la coupe C3 (Fig. B.63):

Le nettoyage et le relevé de la coupe sédimentaire C3, qui présente près de 5 m de puissance, bien que le fond de la canalisation n'ait pu être atteint lors de nos travaux de terrain, ont permis d'identifier différents épisodes de sédimentation.

- A la base de la coupe, située à la cote 125,60 m, des dépôts de précipitation ferrugineuse très compacts sont reconnus, sur une puissance voisine de 30 cm (UF 947). La difficulté de casser cette couche n'a pas permis d'avoir sa base ;
- une cavité (UF 946), sur 20 cm, probablement due aux travaux de M. Fendri lors des fouilles dans les années 1960 ;
- une séquence de précipitation carbonatée d'une puissance de 2 m, dont le sommet atteint la cote 128,20 m. Nous observons deux régimes de précipitation différents dans cette séquence : un premier épisode de lamines en position chaotique avec quelques faciès bourgeonnant au contact des parois de l'aqueduc (UF 945) puis une succession de fines lamines carbonatées en position horizontale ou sub-horizontale (UF 944), formant un véritable faciès en mille-feuilles (faciès *puff pastry*). Dans cette séquence de lamines carbonatées, nous retrouvons quelques éléments détritiques, tels que quelques cailloux épars ainsi qu'un élément anthropique : un fragment de tube de coffrage ;
- une série de très fines lamines oranges, d'une épaisseur de 10 cm, extrêmement friables, et surmontant la précipitation de lamines carbonatées (UF 943) ;
- un bloc détérioré (UF 942) correspondant à une dalle de couverture de l'aqueduc antique, en position secondaire dans la coupe ;
- une série de sédiments sablo-argileux et quelques graviers de 50 cm de puissance (UF 941), sans litages et avec de nombreux tessons ;
- une dalle de couverture de l'aqueduc très certainement en place (UF 769), contiguë à une seconde dalle de couverture, partiellement préservée (dalle 770 : 0,76*0,53*0,22 m) et calée par deux pierres de champs. Cette dernière présente des dimensions équivalentes à celles des dalles de couverture, mais sa position alignée sur la bordure sud de la canalisation est originale. De plus, elle présente sur sa face supérieure, des tracés géométriques (Fig. B.62) représentant partiellement deux hexagones irréguliers imbriqués ;
- un niveau de terre brune (UF 940) reposant sur les dalles de couverture 769 et 770, constituant l'horizon de sol actuel.

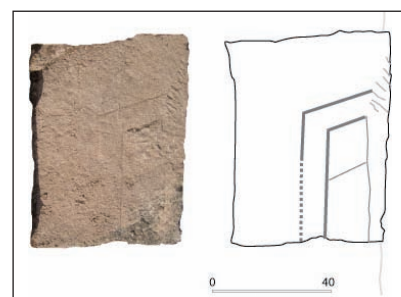


Figure B.62. Dalle de couverture marquée de l'aqueduc thermal.

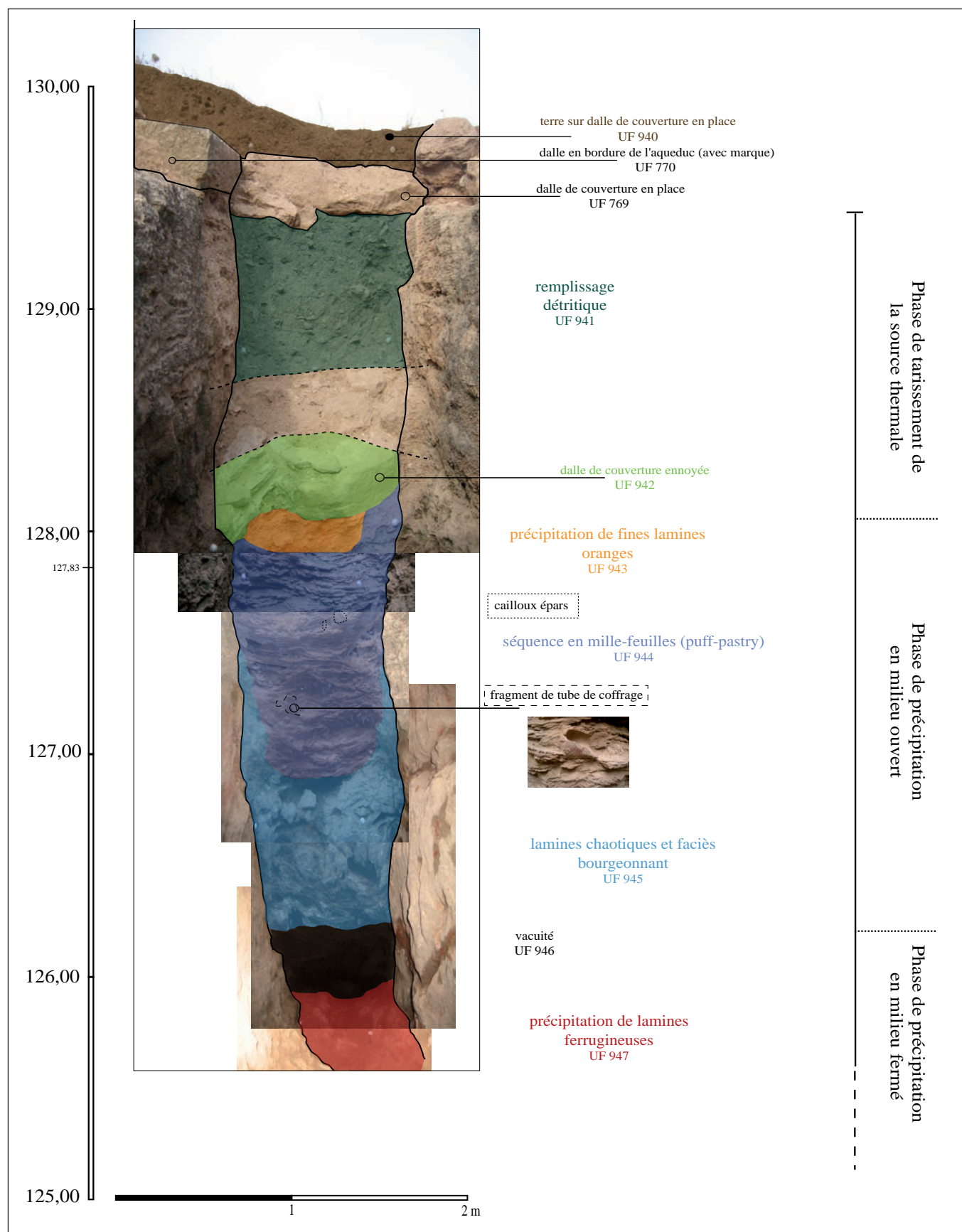


Figure B.63. Description et interprétation géoarchéologique de la coupe C3 du colmatage sédimentaire de l'aqueduc thermal de Jebel Oust ; voir les commentaires dans le texte.

Interprétation de la coupe C3 :

La coupe C3 du colmatage sédimentaire de l'aqueduc à environ mi-parcours de celui-ci présente quelques caractéristiques qui permettent de retracer une partie de son histoire. Le premier niveau de précipitation, exclusivement ferrugineux et compact (UF 947), retrouvé à la base de la coupe, est à relier aux niveaux ferrugineux observés dans les portions plus en amont de l'aqueduc, dans les coupes C1 et C2 (UF 2796/1 et UF 2796/2, respectivement). Ces précipitations ferrugineuses témoignent d'une période pendant laquelle l'eau thermale circulait entièrement en souterrain depuis la source, rendant l'eau sacrée inaccessible et invisible. La cavité retrouvée au sein de ce niveau dans la coupe C3 (UF 946) représente certainement une petite relique des fouilles antérieures de M. Fendri. Le puissant niveau de précipitations de lamines carbonatées (UF 945 et UF 944) est issu de la précipitation des carbonates générée par l'eau thermale et est à relier aux UF 2797/1 de la coupe C1 et UF 2797/2 de la coupe C2, c'est-à-dire à la phase au cours de laquelle la zone de la source est un milieu ouvert et pendant laquelle les carbonates précipitent depuis la source. L'analyse du faciès de ces carbonates amène certaines informations primordiales quant au comportement dynamique de l'eau thermale dans ce secteur. Les carbonates précipitent en très fines lamines générées par un film bactérien flottant à la surface de l'eau et formant un radeau qui finit par couler et se déposer sur le fond, formant, au fur et à mesure des répétitions successives de ce phénomène de précipitation, un véritable mille-feuilles de lamines carbonatées. C'est un remplissage en *puff pastry*, caractérisé par un faciès en mille-feuilles (*paper-thin raft travertine*) expliqué par le phénomène de « glace d'eau chaude » (*hot water ice*), ces fins radeaux de calcite flottant à la surface de l'eau et qui finissent par plonger et se déposer au fond du canal sous le poids croissant de la cristallisation de la calcite et de l'activité cyanobactérienne.

Les irrégularités observées dans l'assemblage des lamines précipitées sont dues à la présence sur le fond de l'écoulement de l'eau thermale d'éléments détritiques naturels, tels que des cailloux, et d'éléments anthropiques, tel que le fragment de tube de coffrage. Ceux-ci vont briser le film de carbonates lorsque celui-ci touche le fond après avoir coulé, sans empêcher la formation de la lamine carbonatée, mais en influençant largement sa morphologie. La présence d'un tel faciès en mille-feuilles dans ce secteur traduit un hydrodynamisme relativement faible, puisqu'il faut imaginer un flux d'eau régulier et continu qui voit se former à sa surface un film microbien, sans véritable perturbation dynamique du milieu. Ce faible hydrodynamisme s'explique par la faible pente topographique qui existe dans la canalisation acheminant l'eau thermale depuis la zone cultuelle jusqu'aux thermes.

Le bloc retrouvé dans la coupe (UF 942) correspond à un fragment de dalle de couverture de l'aqueduc qui s'est écroulée à un moment donné, postérieurement au tarissement de la source thermale puisque cette dalle se retrouve au-dessus des sédiments précipités issus du fonctionnement de la source thermale. Cette dalle se retrouve véritablement ennoyée dans les sédiments de colmatage de l'aqueduc puisque, suite à son effondrement depuis sa position sommitale, elle s'est trouvée recouverte par les sédiments exclusivement détritiques et contenant des tessons archéologiques (UF 941) qui se mettent en place postérieurement, lors d'une phase de

tarissement de la source thermique. Ce niveau de sédiments exclusivement détritiques correspond aux niveaux détritiques repérés dans les coupes C1 et C2, avec respectivement les UF 2798/1 et 2798/2.

Les dalles de couverture encore en place (UF 769 et UF 770) sont extrêmement intéressantes puisqu'elles indiquent de manière certaine le niveau d'arasement de l'aqueduc lors de son fonctionnement, au même titre que les dalles de couverture retrouvées en place plus en aval dans le même secteur. De plus, par sa position originale (décalée par rapport au tracé de la canalisation, alignée sur la bordure sud de cette dernière) et par la marque inscrite sur sa face supérieure, l'une d'entre elles (UF 770) possède un caractère, certes ambigu, mais riche en hypothèses et en informations concernant sa véritable fonction. Nous pensons voir dans cette dalle remarquable une marque au sol indiquant la position d'un probable regard, la matérialisation d'un losange symbolisant ce regard. La présence d'un regard à cet endroit s'explique aisément par la volonté d'obtenir un accès dans la canalisation à mi-pente, pour d'éventuels entretiens, voir de réfections. Cette marque fut certainement repérée par M. Fendri lorsqu'il dirigeait les fouilles archéologiques menées sur le site dans les années 1960, ce qui l'entraîna à effectuer d'importants travaux dans ce secteur.

Nous identifions dans la coupe C3 de colmatage sédimentaire de l'aqueduc, dans le secteur S20 situé à mi-versant, les deux phases fondamentales que nous avons déjà pu observer dans les coupes C1 et C2 situées en amont. Une première phase de sédiments précipités correspondant au fonctionnement de la source thermique, avec respectivement un premier épisode ferrugineux suivi d'un second épisode carbonaté, qui sont liés respectivement aux phases successives de milieu fermé puis de milieu ouvert au niveau de la zone cultuelle. Il s'ensuit une phase de tarissement de la source chaude, pendant laquelle la canalisation est colmatée par des sédiments exclusivement détritiques et traduite par la présence de nombreux éléments anthropiques, signe d'un abandon du site thermal en tant que tel.

Synthèse géoarchéologique de la zone culturelle et de l'aqueduc associé :

La relation entre le sanctuaire et la source thermique associée définissant ce que nous appelons le complexe cultuel du site de Jebel Oust présente une histoire et un fonctionnement multiphasés, qu'illustre une reconstitution géoarchéologique des deux niveaux de captage antiques (Fig. B.64), définie au sein d'une synthèse chronologique globale (Fig. B.66).

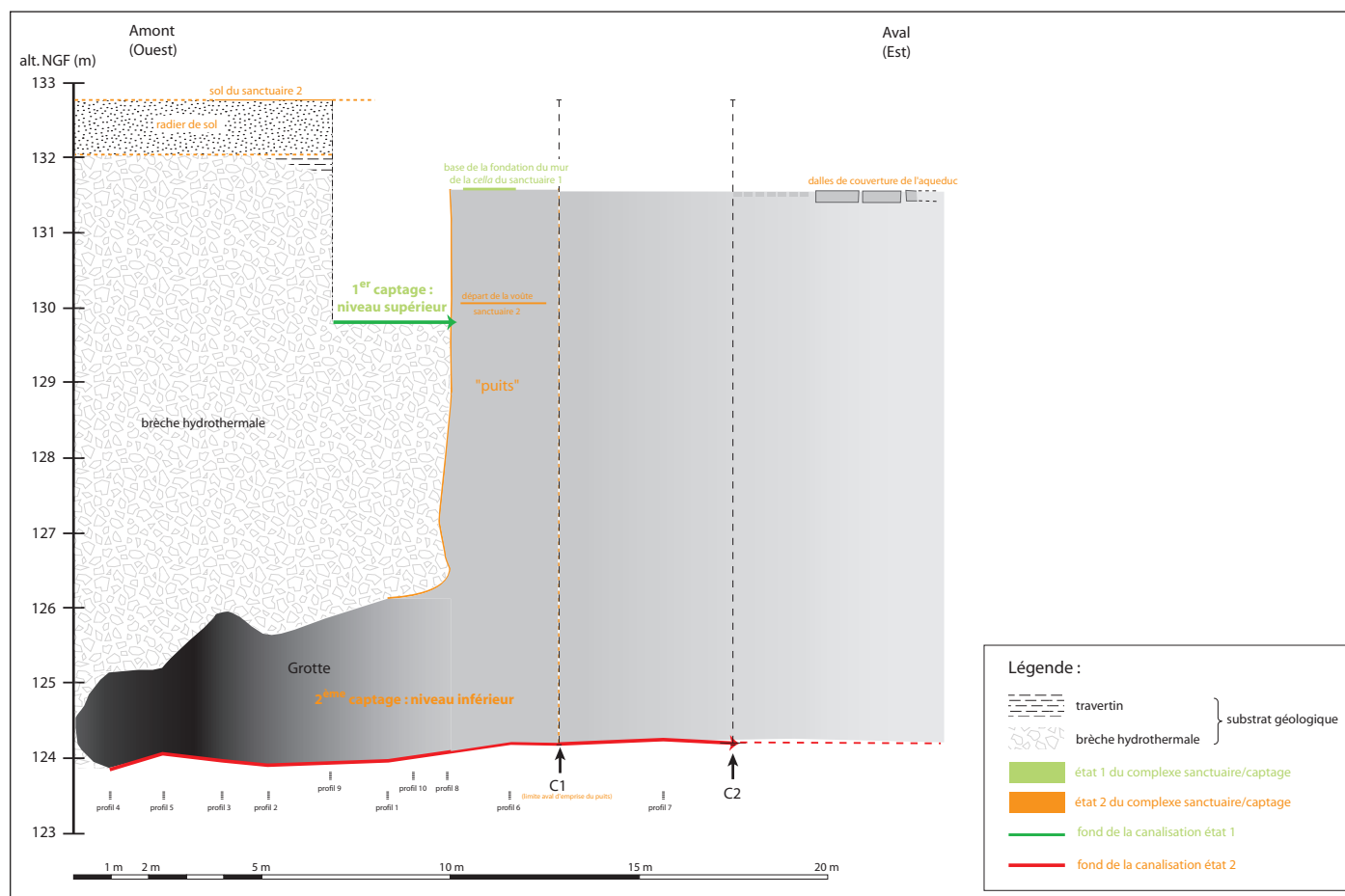


Figure B.64. Restitution synthétique (profil ouest-est) des deux captages antiques de la source chaude de Jebel Oust.

Aucune structure construite antérieure à l'époque romaine n'a été identifiée autour de la source. On peut donc considérer que celle-ci sortait naturellement sur le versant, dans une vasque d'eau chaude, comme on en voit encore surgir en Islande (par exemple, le site de Geyser, Fig. B.65).



Figure B.65. L'évent d'une source chaude sur le site de Geyser (Islande).

Un premier sanctuaire romain, construit autour de l'évent de la source thermique se situe à un niveau topographique relativement haut (cote : 129, 80 m). Il ne reste que peu de vestiges des structures annexes, en particulier des structures hydrauliques, correspondant à ce premier complexe cultuel. Un petit aqueduc qui acheminait l'eau chaude vers des structures potentielles situées en aval, a entièrement été effacé par les aménagements postérieurs. Il ne subsiste que le petit captage visible en arrière, c.-à-d. à l'ouest de la *cella* du premier temple (**état 1 du captage**).

La monumentalisation du sanctuaire romain, au cours de la seconde moitié du II^e s., s'accompagne de l'aménagement d'un large et profond « puits » donnant accès à une vaste cavité hydrothermale et par le creusement d'un profond aqueduc servant à alimenter en eau chaude l'édifice thermal localisé en contrebas. Le niveau topographique de l'évent thermal (cote : 124, 20 m) est abaissé de plus 5 m, et l'eau est captée au sein d'une grotte naturelle profonde. Cette grotte fut l'objet de creusement de petits canaux qui convergent en aval vers le départ de l'aqueduc pour pallier aux variations de niveau de l'eau thermique liées aux variations des précipitations dans la région. **Ce second état du sanctuaire romain** présente des aménagements architecturaux construits autour du « puits » d'accès à la cavité thermique profonde, second état du captage de la source chaude. La *cella* du temple est alors reculée vers l'ouest, en arrière du « puits », par rapport à la *cella* du temple 1. Le « puits » de captage est recouvert par l'escalier et le *pronaos* du temple, soutenus par une voûte qui surplombe la cavité. Les vestiges de départ de cette voûte demeurent visibles dans la partie supérieure du « puits », sur les parois nord et sud (profil 6). C'est à ce second état du sanctuaire romain que doit être associée la première phase de dépôt repérée à la base de la séquence de colmatage de l'aqueduc, et caractérisé par des sédiments exclusivement ferrugineux, qui reflètent un environnement de dépôt fermé avec peu ou pas d'échange avec l'air extérieur (**état 2a du captage**).

La transformation du sanctuaire romain en **lieu de culte paléochrétien**, sans doute vers la fin du IV^e siècle, engendre des modifications tant au niveau des aménagements architecturaux, qu'au niveau des conditions de captage de la source chaude. Un baptistère de forme cruciforme est installé au sein de la *cella* romaine et une église est construite sur le côté nord du temple romain (du portique). L'installation de l'église, à proximité mais non à l'intérieur de la cour du temple, s'explique par la présence du large « puits » dont les structures surplombantes se sont certainement effondrées à cette époque. Ce phénomène provoque une ouverture du milieu de sédimentation (l'évent thermal devient alors en contact direct avec l'air extérieur) et une modification radical de l'environnement de dépôt au sein du captage (**état 2b du captage**), avec la mise en place de véritables travertins carbonatés correspondant au second épisode de sédimentation repérés sur les parois du captage et au sein du colmatage sédimentaire de l'aqueduc. Au niveau de la source et du départ de l'aqueduc, l'hydrodynamisme est relativement fort pour permettre une précipitation des carbonates sur le fond ainsi que sur les parois de l'aqueduc en formant des épaulements, une morphologie que l'on rencontre dans la majorité des dépôts d'aqueducs. En revanche, à mi-versant, l'hydrodynamisme de l'eau est relativement faible, mais reste régulier, générant un faciès en mille-feuilles progressant verticalement depuis le fond de l'aqueduc.

Enfin, les dépôts de nature détritique qui scellent la séquence de colmatage de l'aqueduc témoignent du **tarissement de la source thermique**, sans doute dès la fin de l'Antiquité, et qui entraîne logiquement l'abandon des pratiques cultuelles et thermales sur le site antique et l'absence de thermes médiévaux à Jebel Oust.

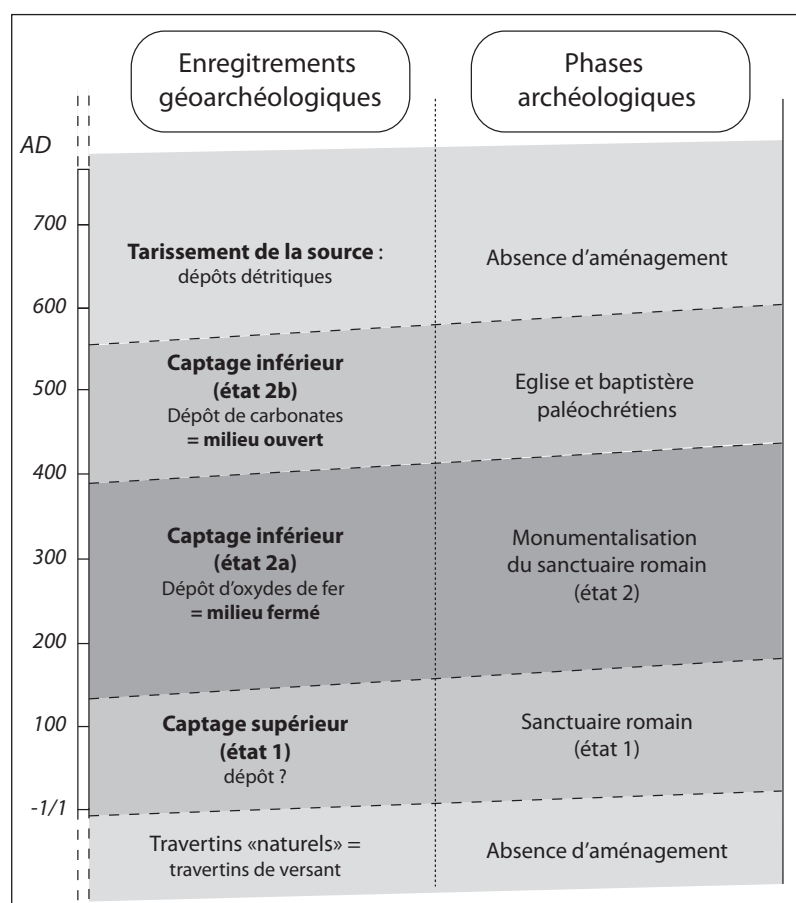


Figure B.66.
Proposition de synthèse chronologique de la zone cultuelle de Jebel Oust d'après l'analyse géoarchéologique.

B.III.2. Géoarchéologie des travertins anthropiques de l'édifice thermal antique.

B.III.2.1. Le faciès sédimentaire des travertins des thermes, reflet de la nature et de la fonction des structures hydrauliques.

Cette étude sur la contribution des travertins à l'analyse diachronique, fonctionnelle et architecturale des thermes antiques de Jebel Oust a été présentée lors du colloque Balnéorient « *βαλανεῖα, thermes et hammams, 25 siècles de bain collectif* » (Damas, 6-9 novembre 2009), dont les actes sont en cours de parution : Broise, H. et Curie, J. – *L'étude de travertins carbonatés du sanctuaire de Jebel Oust (Tunisie) : une contribution à l'analyse diachronique, fonctionnelle et architectural des thermes* (Broise et Curie, 2009)

L'analyse du faciès des travertins préservés dans les thermes antiques de Jebel Oust est effectuée à l'échelle macroscopique (observations à l'œil nu) et microscopique (observations en lame mince, cathodoluminescence, MEB, DRX). Celle-ci a permis d'identifier plusieurs types de faciès sédimentaire qu'il est possible de relier à des environnements de dépôt différents qui reflètent alors la nature et la fonction des structures hydrauliques dans lesquelles le dépôt s'est effectué (salles thermales, canalisations, etc.).

La signature géochimique (isotopes stables de l'oxygène et du carbone) de chaque faciès défini viendra appuyer cette différenciation et amener des informations complémentaires sur la nature de l'eau et la fonction des salles thermales.

B.III.2.1.1. Localisation des échantillons de travertins dans l'édifice thermal.

La volonté d'avoir un panel d'échantillons représentatif de la diversité des travertins dans les grandes salles de l'édifice thermal explique la répartition des échantillons observés, prélevés et analysés (Fig. B.67) :

- La salle T1 – JO-05-34 ; JO-05-38 ; JO-07-49
- La salle T5 – JO-05-39 ; JO-05-41 ; JO-05-45 ; JO-07-130
- La salle T7 – JO-07-114
- La salle T9 – JO-05-33 ; JO-05-40 ; JO-07-44 ; JO-07-63 ; JO-07-66 ; JO-07-109
- La salle T11 – JO-05-36 ; JO-05-37 ; JO-07-101 ; JO-07-102
- La salle T12 – JO-05-29 ; JO-07-99 ; JO-07-100
- La salle T13 – JO-07-103
- La salle T19 – JO-07-106
- La salle T20 – JO-05-53 ; JO-06-09 ; JO-06-11 ; JO-07-104
- La salle T23 – JO-06-10 ; JO-07-107
- La salle T24 – JO-05-43

Ainsi, l'ensemble des grandes et principales salles composant l'édifice thermique ont été prélevées au cours des différentes missions sur le terrain.

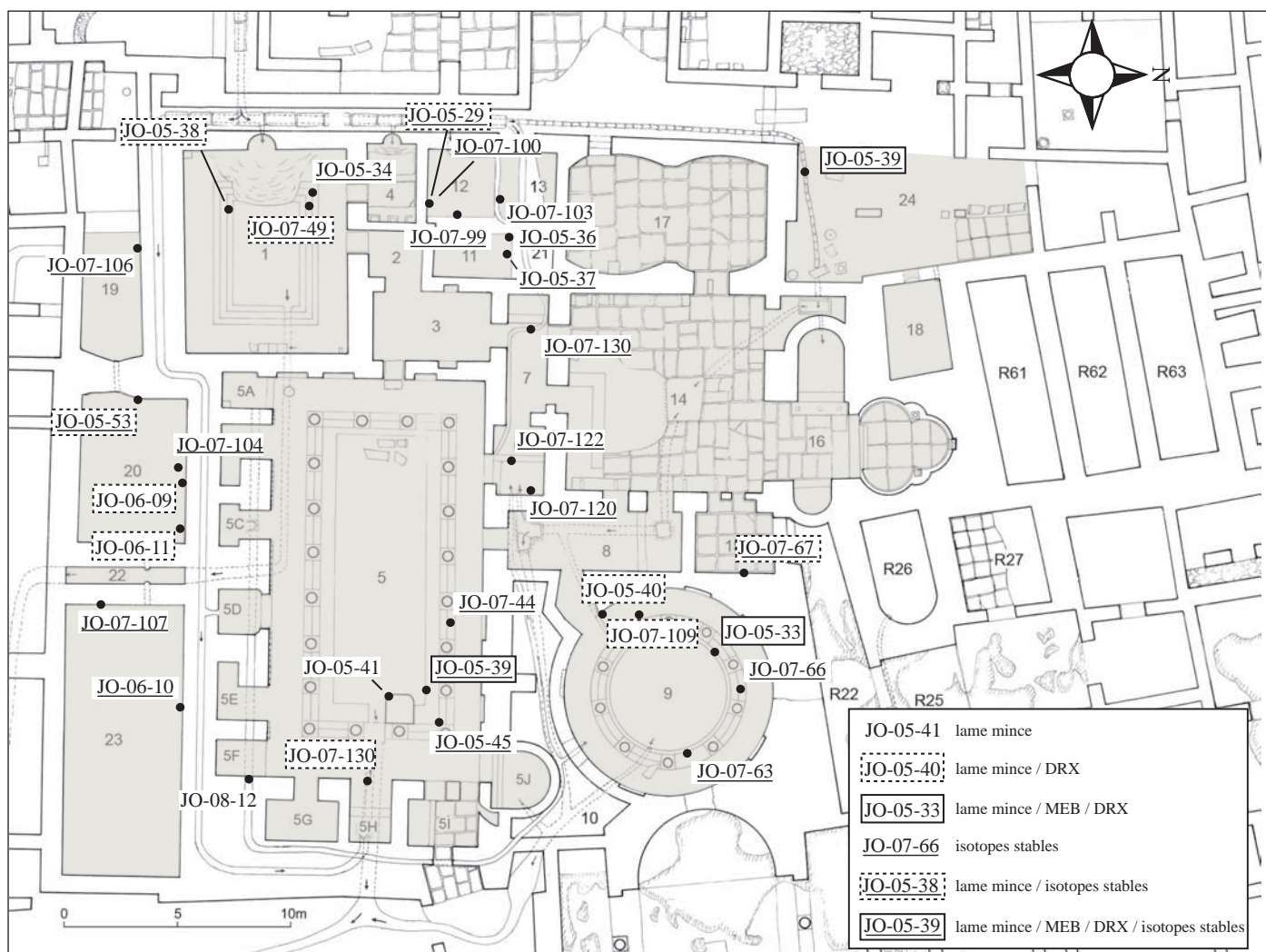


Figure B.67. Localisation des échantillons pour l'analyse des travertins anthropiques des thermes antiques de Jebel Oust.

B.III.2.1.2. Les travertins à lamines millimétriques et régulières : le faciès A (planche: Fig. B.68).

Le premier type de faciès identifié au sein des grandes salles thermales de Jebel Oust est un faciès présentant à l'échelle macroscopique une succession de fines lamines inframillimétriques et régulières. Ce faciès est repéré dans les travertins déposés et préservés au sein des grandes salles T1, rectangulaire (Fig. B.68a), et T9, circulaire (Fig. B.68e), aussi bien que dans le bassin central de chacune de ces deux salles que sur le sol de l'espace de circulation périphérique. Ce type de travertin moule ainsi les marches d'accès au bassin des salles T1 et T9 (Fig. B.68b et B.68f), les bases des colonnes de la salle T9 (Fig. B.68f) par un dépôt d'une vingtaine de centimètres d'épaisseur, et forme également un bourrelet d'une dizaine de centimètres d'épaisseur à la base des murs de ces deux salles (Fig. B.68g).

Le faciès A est caractérisé par une succession visible à l'œil nu (échelle macroscopique) de lamines alternativement claires et sombres (T1 ; Fig. B.68c et B.68d ; T9 : Fig. B.68h). L'observation en lame mince permet de retrouver à l'échelle microscopique cette succession de lamines alternativement claires et sombres (Fig. B.68j), parfois entre deux phases de mortier (fig. B.68i). La succession de lamines claires et sombres se traduit sous la forme de lamines à précipitation microsparitique à sparitique (lamines claires) et de lamines à précipitation micritique (lamines sombres) (Fig. B.68k). Les lamines claires, d'une épaisseur moyenne de 400 μm , apparaissent généralement plus épaisses que les lamines sombres, d'une épaisseur moyenne de 100 à 200 μm . Deux types de cristallisation sont ainsi mis en œuvre successivement dans le dépôt de travertin, une micritisation, qui apparaît sombre en lame mince, et une cristallisation microsparitique à sparitique, claire en lame mince (Fig. B.68o ; et détail des cristaux sparitiques : Fig. B.68p).

En parallèle de cette double précipitation du carbonate, quelques éléments significatifs sont remarqués. A certains endroits dans le travertin, et exclusivement au sein des lamines micritiques sombres, nous avons identifié des spicules noirs regroupés en banc désorganisé (Fig. B.68l), dont la taille avoisine 100 μm et qui pourraient être des vestiges d'organismes biologiques (champignons ?).

Dans les lamines microsparitiques claires, nous observons sporadiquement des fantômes de structures à croissance colonnaire (Fig. F.68m), qui donnent un aspect légèrement vacuolaire aux lamines, et qui sont probablement des traces de micro-organismes biologiques dont la disparition a laissé des pores dans le sédiment. Enfin, ponctuellement au sein de ce type de travertin, il existe une certaine part de grains détritiques (Fig. B.68n), qui se sont retrouvés piégés et encroûtés par la précipitation carbonatée.

Les observations au MEB ont permis de définir la précipitation micritique et de mettre en évidence la présence de quelques petites sphérules (Fig. B.68q), souvent caractéristiques d'une précipitation de cristaux aragonitiques radiaux. L'analyse en cathodoluminescence d'un échantillon montre une certaine zonation calcitique du sédiment et la part détritique présente modestement (Fig. B.68r). Ce travertin se développe sur un mortier non-luminescent et présente une succession de lamines calcitiques luminescentes qui permet également de reconnaître de l'aragonite (Fig. B.68s). L'analyse DRX d'un échantillon de la salle T9 (JO-07-109) confirme la présence simultanée des deux formes de carbonate de calcium, la calcite (94%) et l'aragonite (6%) dans le travertin (Fig. B.68t).

L'ensemble des caractéristiques pétrographiques et minéralogiques du faciès A traduit une précipitation homogène et régulière du travertin responsable de la succession du dépôt de lamines. La lamination est alternée (*alternate lamination*) entre des lamines micritiques et des lamines microsparitiques à sparitiques, ce qui traduit une certaine variation dans la précipitation carbonatée. La rareté, voire l'absence, de micro-organismes biologiques (bactéries, végétaux) dans les dépôts, susceptibles de participer et d'influencer la précipitation du carbonate, permet de reconnaître une précipitation exclusivement physico-chimique du travertin. Le doublet de lamines alternativement sombres (micritiques) et claires (sparitiques) serait le reflet des variations hydro-

logiques annuelles de la source chaude traduites par une saison humide/fort débit et une saison sèche/faible débit.

L'analyse des isotopes stables de l'oxygène et du carbone sur des échantillons de faciès A provenant de la salle T1 (JO-05-38, n=10 et JO-07-49, n=22) donne des valeurs moyennes de -8,63 ‰ PDB en $\delta^{18}\text{O}$ et de 2,00 ‰ PDB en $\delta^{13}\text{C}$. Les travertins de faciès A de la salle T9 (JO-07-66, n=44 et JO-07-63, n=18) possèdent des valeurs moyennes de -8,75 ‰ PDB en $\delta^{18}\text{O}$ et de 1,15 ‰ PDB en $\delta^{13}\text{C}$.

Le faciès A définit un travertin qui se développe dans des piscines (*natatio*) caractérisées par une alimentation régulière en eau chaude de la source thermique et qui sont couvertes par un toit : la salle rectangulaire T1 et la rotonde T9.

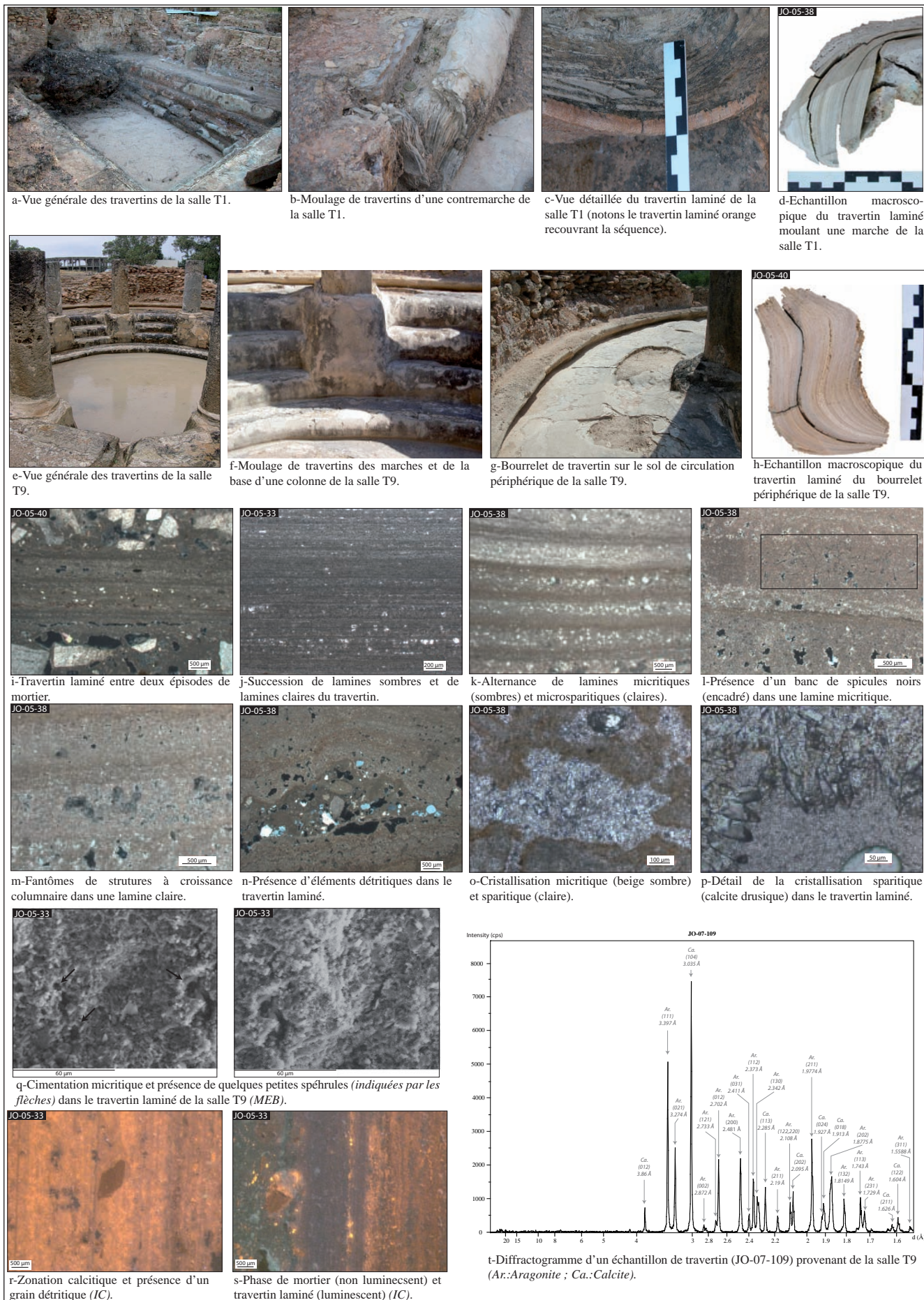


Figure B.68. Planche pétrographique du faciès A défini dans les thermes antiques de Jebel Oust ; voir les commentaires dans le texte.

B.III.2.1.3. Les travertins à lamines denses et poreuses : le faciès B (planche : Fig. B.69 et B.70).

Le second faciès, le faciès B, identifié au sein de l'édifice thermal antique est un faciès laminé blanchâtre qui présente à l'œil nu une succession de lamines alternativement denses et poreuses, de taille millimétrique. Le faciès B est repéré dans le travertin déposé dans la salle T5 (Fig. B.69a), drapant d'un dépôt d'un dépôt d'une vingtaine de centimètres de puissance les marches d'accès au bassin central, le fond de ce bassin, ainsi que la base des colonnes de la pièce et le piédestal situé sur la bordure orientale du bassin (Fig. B.69b). Ce travertin est également identifié sur le sol de l'espace de circulation périphérique et forme un bourrelet d'une dizaine de centimètres d'épaisseur à la base des murs de la salle (cf. B.III.2.4).

Le faciès B est caractérisé par une succession de lamines blanchâtres, alternativement dense et poreuse, visible à l'œil nu (Fig. B.69c) et que nous retrouvons à l'échelle microscopique sous la forme de lamines denses micritiques et de lamines vacuolaires essentiellement microsparitiques et sparitiques (Fig. B.69d). L'analyse microscopique révèle différentes structures : des structures (sub)circulaires (Fig. B.69e) dont la paroi est micritisée et en périphérie desquelles ont précipité des cristaux de sparite et de microsparite (Fig. B.69f), et des fines structures en forme de baguettes micritiques (Fig. B.69g) autour desquelles ont précipité des cristaux microsparitiques et sparitiques (Fig. B.69h).

L'ensemble de ces structures correspond à des vestiges de fragments d'organismes biologiques, dont certains sont des restes de manchons algaires (Fig. B.69i), maintenant calcitisés. Un phénomène de calcitisation de la paroi de ces organismes a engendré une précipitation micritique, alors que des cristaux de sparite et de microsparite ont précipité en périphérie. La disparition des tissus biologiques lors de la précipitation du travertin engendre la grande porosité du sédiment donnant les lamines vacuolaires visible à l'œil nu. La majorité des pores ainsi créés connaissent une cristallisation sparitique sur leur paroi (Fig. B.69j). En parallèle de ces structures biologiques végétales, nous observons la présence de structures à croissance colonnaire, dont certaines sont parfaitement développées dans le travertin (Fig. B.69k). Ces structures stromatolithiques, d'origine cyanobactérienne, correspondent à une succession de micro-lamines sombres et micritiques générées au cours de leur développement, simultanément au dépôt du travertin.

L'analyse en cathodoluminescence met en évidence la nature calcitique des fines baguettes micritisées et des structures stromatolithiques (Fig. B.69l), et permet d'identifier une précipitation parfois aragonitique. La nature essentiellement calcitique du sédiment est montrée par l'analyse DRX d'un échantillon (JO-07-130) provenant de T5 (Fig. B.69m). Les observations au MEB ont permis d'identifier des cristaux sparitiques, des cristaux de sel (Fig. B.70.a), et de rares cristaux fibreux certainement aragonitiques (?) parfois bien développés (Fig. B.70c) mais dont la structure est souvent désorganisée (Fig. B.70b) et perturbée par les cristaux de sel (Fig. B.70d et Fig. B.70e) ou se retrouve englobée par les cristaux sparitiques (Fig. B.70f).

L'ensemble des caractéristiques pétrographiques et minéralogiques du faciès B traduit une précipitation homogène et régulière du travertin responsable de la succession de lamines. La lamination est une lamination alter-

née (*alternate lamination*) entre des lamines denses et micritiques et des lamines poreuses où la précipitation est micritique à microsparitique/sparitique ; ceci reflète une certaine variation dans la précipitation carbonatée. La présence d'organismes biologiques dans le sédiment, en particulier les vestiges d'organismes végétaux (manchons d'algues) et les traces laissées par des micro-organismes cyanobactériens à l'origine des croissances stromatolithiques visibles, traduisent une forte influence biologique dans la précipitation carbonatée, en complément de l'influence des paramètres physico-chimiques. Ces organismes induisent la précipitation du carbonate par leur activité biologique qui nécessite une certaine quantité de lumière naturelle, notamment pour les organismes algaires. La double influence, biologique et physique, est à l'origine de la précipitation du carbonate de calcium, essentiellement sous la forme de calcite, la présence d'aragonite restant modeste et certainement instable (remplacement par de la calcite ?).

L'analyse des isotopes stables de l'oxygène et du carbone sur un échantillon de faciès B de la salle T5 (JO-05-39 ; n=6) offre des valeurs de -7,72 ‰ PDB en $\delta^{18}\text{O}$ et de 2,93 ‰ PDB en $\delta^{13}\text{C}$.

Le faciès B définit un travertin qui se développe dans une piscine (*natatio*) caractérisée par une alimentation régulière en eau chaude de la source thermique et qui est ouverte à la lumière, c'est-à-dire non couverte par un toit : la salle rectangulaire T5.

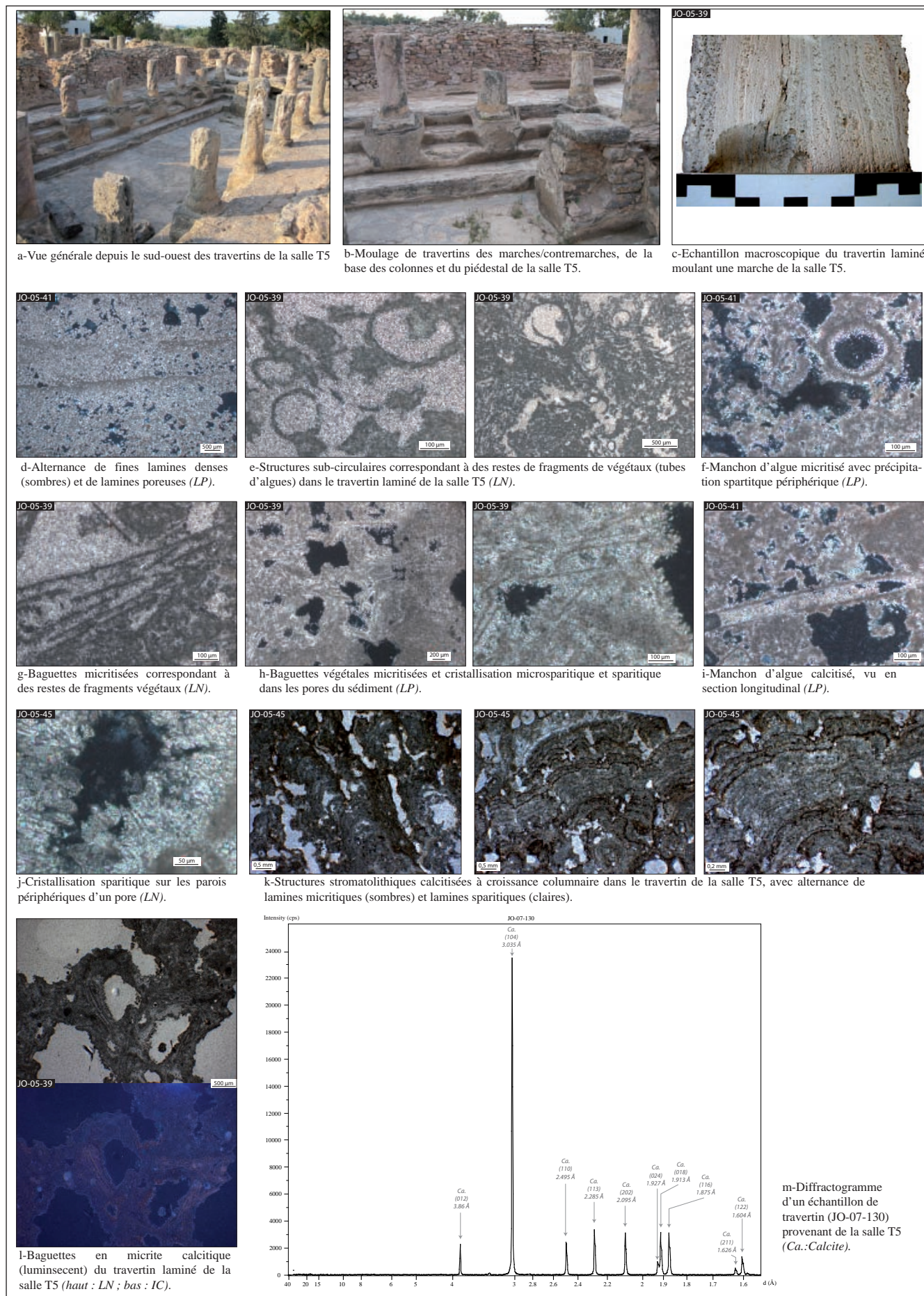


Figure B.69. Planche pétrographique du faciès B défini dans les thermes antiques de Jebel Oust ; voir les commentaires dans le texte.

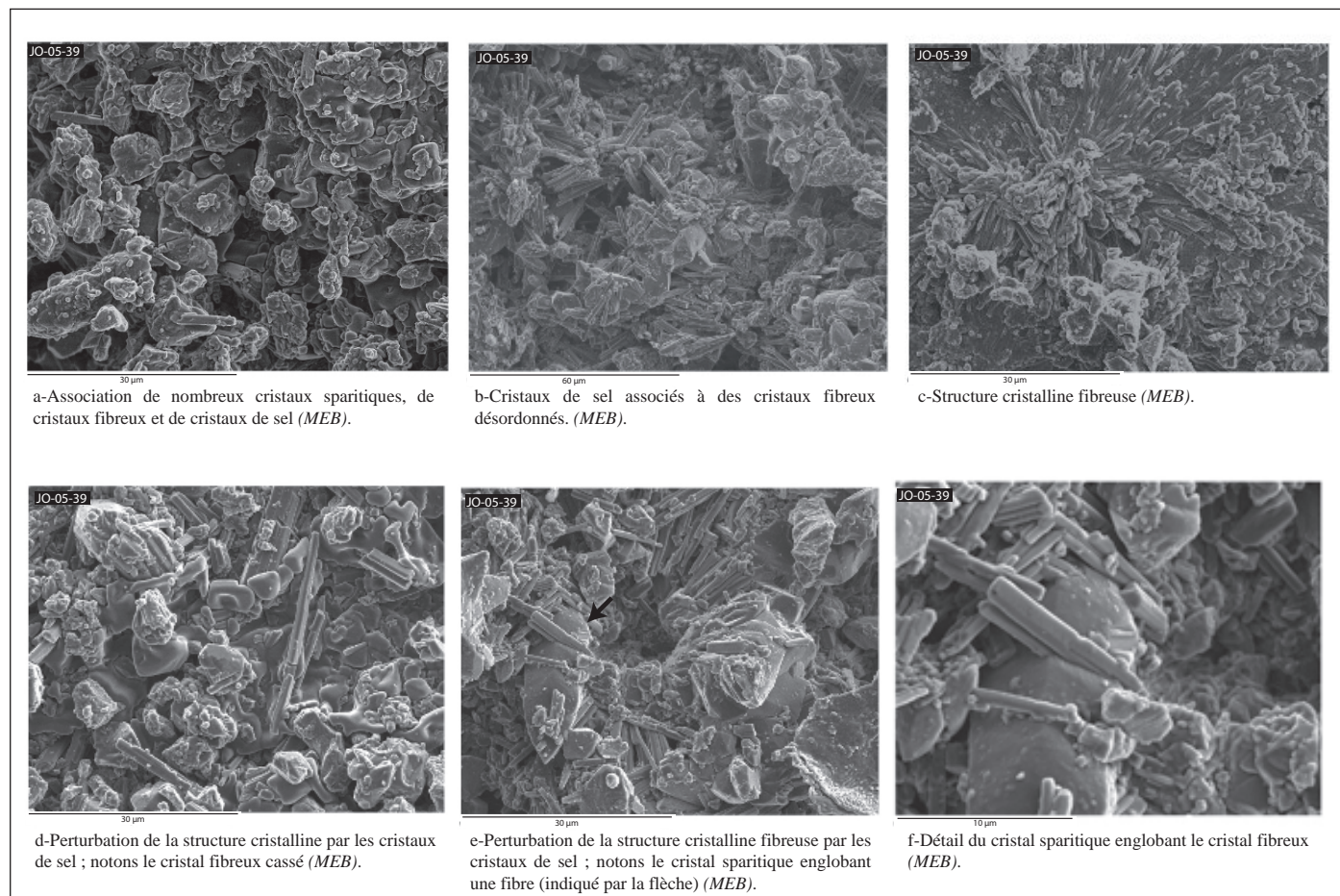


Figure B.70. Planche pétrographique (images MEB, suite de la Fig. B.69) du faciès B défini dans les thermes antiques de Jebel Oust ; voir les commentaires dans le texte.

B.III.2.1.4. Les travertins à structure spongieuse : le faciès C (planche : Fig. B.71 et B.72).

Le faciès C identifié dans les travertins préservés dans l'édifice thermal ne présente pas de caractère laminé particulier, contrairement aux faciès précédents A et B. Il est repéré dans les grandes salles localisées en bordure sud des thermes (T19, T20 et T23, Fig. B.71a) et d'un groupe de salles situées au centre de l'édifice (T11, T12 et T13, Fig. B.71e). Au sein de ces salles, le travertin s'est développé sur les parois verticales d'une vingtaine de centimètres de puissance, et recouvre leur sol d'un dépôt quelques centimètres d'épaisseur (T19 : Fig. B.71b et B.71c ; T12 : Fig. B.71f et B.71g). A l'échelle macroscopique, le faciès présente une structure spongieuse (T20 : Fig. B.71d ; T12 : Fig. B.71h), très poreuse (*fenestral porosity*), sans lamination particulièrement marquée ou qui apparaît extrêmement diffuse.

A l'échelle microscopique nous retrouvons la grande porosité du sédiment et la cristallisation du carbonate sous forme micritique et microsparitique (Fig. B.71j). L'observation en lame mince a révélé la présence d'organismes biologiques, tels les nombreux gastéropodes présents dans le dépôt de travertin dont la coquille a été calcitisée (Fig. B.71i), ainsi que des restes de fragments de végétaux sous la forme de structures (sub) circulaires et de très fines baguettes (Fig. B.71l et B.71m). Ces structures ont été micritisées et la disparition des tissus biologiques a laissés des pores qui sont partiellement remplis par une cristallisation calcitique microsparitique à sparitique. A certains endroits, nous observons des bulles de gaz encroûtées (Fig. B.71n, détail : Fig. B.71o) souvent regroupées (*coated bubbles*) et associées à des lamines micritiques, de quelques microns de large et dont la forme est souvent légèrement ondulée, correspondant à des films microbiens précipités (Fig. B.71n). Des structures stromatolithiques peuvent être également reconnues en certains endroits, par la précipitation de très fines lamines micritiques successives (Fig. o). La nature calcitique des structures biologiques a pu être vérifiée en cathodoluminescence où les bioclastes tubulaires (manchons d'algue) apparaissent luminescents (Fig. B.71p).

L'observation au MEB de ces travertins met en évidence la cristallisation de calcite microsparitique dans un ciment micritique (Fig. B.72a) et permet d'identifier des cristaux bien développés (euhédraux) de calcite microsparitiques et calcitiques (Fig. B.72b), dont des cristaux de calcite dits en « dents de chien » (Fig. B.72c). L'analyse au MEB a également révélé la présence au sein du sédiment de bourgeonnements de nanoparticules micritiques cernés par une cristallisation microsparitique. Ces nanoparticules sont très certainement des bactéries dont l'activité a engendré une précipitation micritique associée à une précipitation microsparitique périphérique. Ponctuellement dans le dépôt, la fin de la séquence sédimentaire est marquée par la précipitation d'une couronne de cristaux fibreux, probablement aragonitique, et des traces d'oxydes de fer (Fig. B.72k).

Les analyses DRX d'échantillons provenant des salles T19 (JO-07-106), T20 (JO-07-104) et T23 (JO-07-107) prouvent une nature exclusivement calcitique du travertin (Fig. B.72e).

Les analyses des isotopes stables de l'oxygène et du carbone ont été réalisées sur les travertins des salles T11 (JO-05-37 ; n=12), T12 (JO-05-29 ; n=12), T13 (JO-07-103 ; n=1), et des les salles situées dans la partie sud

de l'édifice, T19 (JO-07-106 ; n=5), T20 (JO-05-53 ; n=14) et T23 (JO-06-10 ; n=15). Les échantillons des salles T11, T12 et T13 présentent respectivement des valeurs moyennes en $\delta^{18}\text{O}$ de -6,68 ‰, -7,28 ‰ et -7,06 ‰ PDB, et des valeurs moyennes en $\delta^{13}\text{C}$ de 3,50 ‰, 3,13 ‰ et 3,70 ‰ PDB. Les échantillons des salles T19, T20 et T23 présentent respectivement des valeurs moyennes en $\delta^{18}\text{O}$ de -6,79 ‰, -7,46 ‰ et -6,87 ‰ PDB, et des valeurs moyennes en $\delta^{13}\text{C}$ de 2,88 ‰, 3,52 ‰ et 3,91 ‰ PDB. Dans l'ensemble, les échantillons du faciès C possèdent un $\delta^{18}\text{O}$ moyen de -7,05 ‰ PDB et un $\delta^{13}\text{C}$ moyen de 3,49 ‰ PDB.

Le faciès C présente une structure spongieuse verticale développée sur les murs des salles due à la colonisation par des organismes microbiens des parois verticales. La lamination diffuse qui caractérise ce faciès s'explique par la présence de films microbiens participant à la précipitation calcitique, à laquelle participent également les organismes végétaux cyanobactériens présents. Le fond des bassins est recouvert d'un travertin très finement laminé (*sheet/puff pastry*), engendré par le dépôt successif de films microbiens (*microbial mats*) développés à la surface de l'eau. L'ensemble des caractéristiques pétrographiques et minéralogiques du faciès C traduit une précipitation du travertin sous une influence majoritairement biologique, générant une croûte spongieuse.

Le faciès C définit un travertin qui se développe dans des salles où l'eau chaude de la source thermique stagnait à ciel ouvert (salles non couvertes par un toit), et qui servent de réservoirs de refroidissement : les salles T19, T20 et T23 dans la partie sud des thermes, et la cour de réservoirs T11, T12 et T13 au centre de l'édifice.



Figure B.71. Planché pétrographique du faciès C défini dans les thermes antiques de Jebel Oust ; voir les commentaires dans le texte.

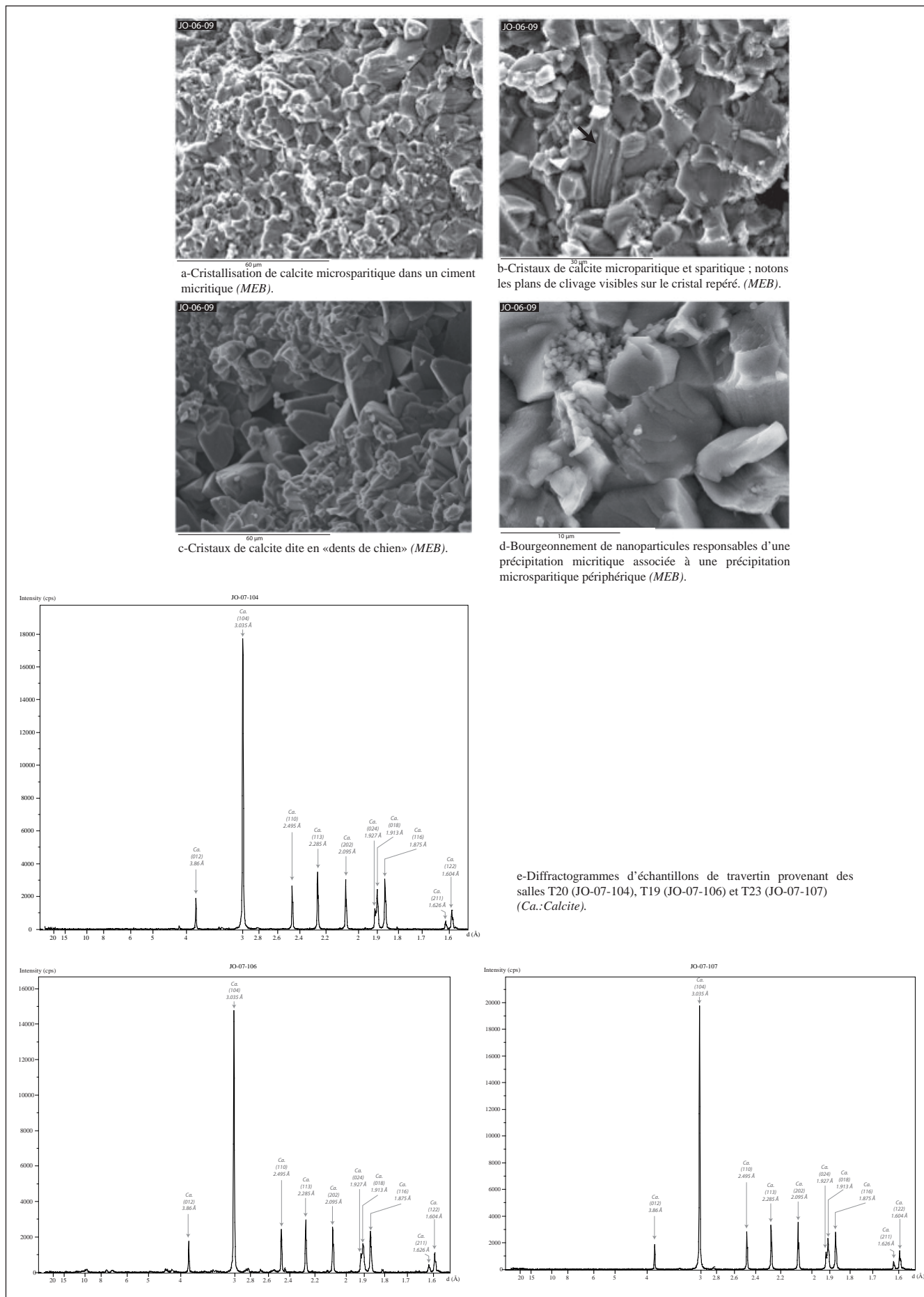


Figure B.72. Planche pétrographique (images MEB et DRX, suite de la Fig. B.71) du faciès C défini dans les thermes antiques de Jebel Oust ; voir les commentaires dans le texte.

B.III.2.1.5. Les travertins fins muraux laminés : le faciès D (planche : Fig. B.73).

Le faciès D est identifié dans des petites salles thermales réparties au sein de l'édifice que sont les salles T6 (Fig. B.73a), T5J (Fig. B.73b), T15 (Fig. B.73c) et T4 (Fig. B.73d), ainsi que dans le petit bassin de la salle T7 (Fig. B.73e). Ces travertins forment de fins dépôts sur les murs de chacun de ces salles (salle T15 : Fig. B.73f et salle T6 : Fig. B.73g) et présentent un macrofaciès principalement finement laminé (T6 : Fig. B.73h ; T4 : Fig. B.73i ; T7 : Fig. B.73j). Les observations à l'échelle microscopique permet d'identifier la précipitation de lamines successives essentiellement micritiques (*repetitive lamination*), apparaissant très opaques, au sein du sédiment (Fig. B.73k et B.73l).

L'analyse DRX d'un échantillon de travertin de la salle T6 (JO-07-120) a montré la présence exclusive d'une seule forme de carbonate, la calcite (Fig. B.73m). L'analyse des isotopes stables de l'oxygène et du carbone sur un échantillon de la salle T15 (JO-07-67 ; n=13) donne des valeurs de -8,36 ‰ PDB en $\delta^{18}\text{O}$ et de 0,99 ‰ PDB en $\delta^{13}\text{C}$.

Ces travertins caractérisés par des dépôts fins sur les parois et le fond de certaines salles, laminés et calcitiques, se développent dans des petits bassins alimentés régulièrement par l'eau thermique : T4, T5J, T6, T7 et T15, et dont l'histoire et le fonctionnement au sein de l'évolution de l'édifice thermique se révèlent complexes.



Figure B.73. Planche pétrographique du faciès D défini dans les thermae antiques de Jebel Oust ; voir les commentaires dans le texte.

B.III.2.1.6. Les travertins à lamines millimétriques oranges : le faciès E (planche : Fig. B.74).

Le faciès à lamines millimétriques oranges a été identifié dans des travertins préservés dans les grandes salles thermales (T1, T5), ainsi que sporadiquement dans certaines petites salles (T2, T3 et T14). Il définit également le travertin de cascade qui s'est développé dans la salle T7 (Fig. B.74a), dont la surface est caractérisée par la formation de micro-terrasses (Fig. B.74b). Dans les salles T1 (Fig. B.74d) et T5, il recouvre les travertins laminés antérieurs (Faciès A et B) et, dans la salle T1, il comprend de nombreux éléments anthropiques, tels des fragments de terre cuite provenant du coffrage de la voûte de la pièce, piégés et encroûtés (Fig. B.74c). A l'échelle macroscopique, le faciès présente une lamination répétitive de fines lamines millimétriques de couleur orange à rougeâtre. L'observation en lames minces du travertin nous révèle une précipitation carbonatée légèrement plus complexe et une lamination qui apparaît alternée (*alternate lamination*). En effet, le microfaciès présente une succession de lamines sparitiques à grands cristaux rayonnants (*ray crystals*) alternant avec des lamines micritiques (Fig. B.74e). A certains endroits, la cristallisation est imparfaite, donnant à la structure cristalline un aspect buissonnant (*shrub crystals*) (Fig. B.74f). L'analyse en cathodoluminescence montre la nature calcitique des lamines micritiques, qui apparaissent lumineuses, et la nature aragonitique des cristaux sparitiques rayonnants (Fig. B.74g).

Les observations au MEB ont permis de mettre en évidence la précipitation radiale de cristaux aragonitiques fibreux ordonnés autour de petites sphérules (Fig. B.74h) associés à des cristaux microsparitiques certainement calcitiques (Fig. B.74i). La présence de bourgeonnements de nanoparticules a pu également être repérée, traduisant une activité bactérienne responsable d'une cristallisation micritique associée à une cristallisation microsparitique périphérique (Fig. B.74j).

Les analyses DRX de deux échantillons provenant des marches de la salle T1 (JO-05-34) et du travertin en cascade de la salle T7 (JO-07-114) montrent la présence des deux formes de carbonate de calcium, calcite (10%) et aragonite (90%), et la présence de gypse ainsi que d'une certaine fraction argileuse traduisant certainement un apport détritique (Fig. B.74k).

L'analyse des isotopes stables de l'oxygène et du carbone, sur des échantillons de la salle T1 (JO-05-34) et T7 (JO-07-49) donne des valeurs moyennes (n=9) de -10,6 ‰ PDB pour le $\delta^{18}\text{O}$ et de 3,26 ‰ PDB pour le $\delta^{13}\text{C}$.

Les caractères pétrographiques et minéralogiques du travertin à lamines oranges traduit une précipitation homogène et régulière responsable de la succession de lamines. La lamination est une lamination alternée entre des lamines micritiques calcitiques et des lamines sparitiques aragonitiques, qui reflète une certaine variation dans la précipitation carbonatée. La présence d'aragonite sous la forme de cristaux bien développés témoigne d'une précipitation issue d'une eau chaude (supérieure à 40°C). En parallèle de l'influence physico-chimique sur la précipitation carbonatée, il existe une influence bactérienne générant une cristallisation micritique et microsparitique dans le sédiment.

Ce travertin présente un faciès de croûte cristalline (*crystalline crust*), avec de grands cristaux aragonitiques et une calcite micritique, témoignant souvent d'une précipitation rapide issue d'écoulements extrêmement turbulents. La position stratigraphique des travertins à lamines oranges, postérieurs aux dépôts laminés des faciès A et B, ainsi que son contenu en matériaux architecturaux (tubes de voûte du toit de la salle T1) témoignent d'un dépôt tardif, lors d'un certain dysfonctionnement (abandon) de l'édifice thermal. L'eau chaude continue à circuler dans les thermes mais n'est plus gérée, et ennoie même des salles sèches lors du fonctionnement normal des thermes (T2, T3 et T14) ou forme des travertins en cascade (T7).

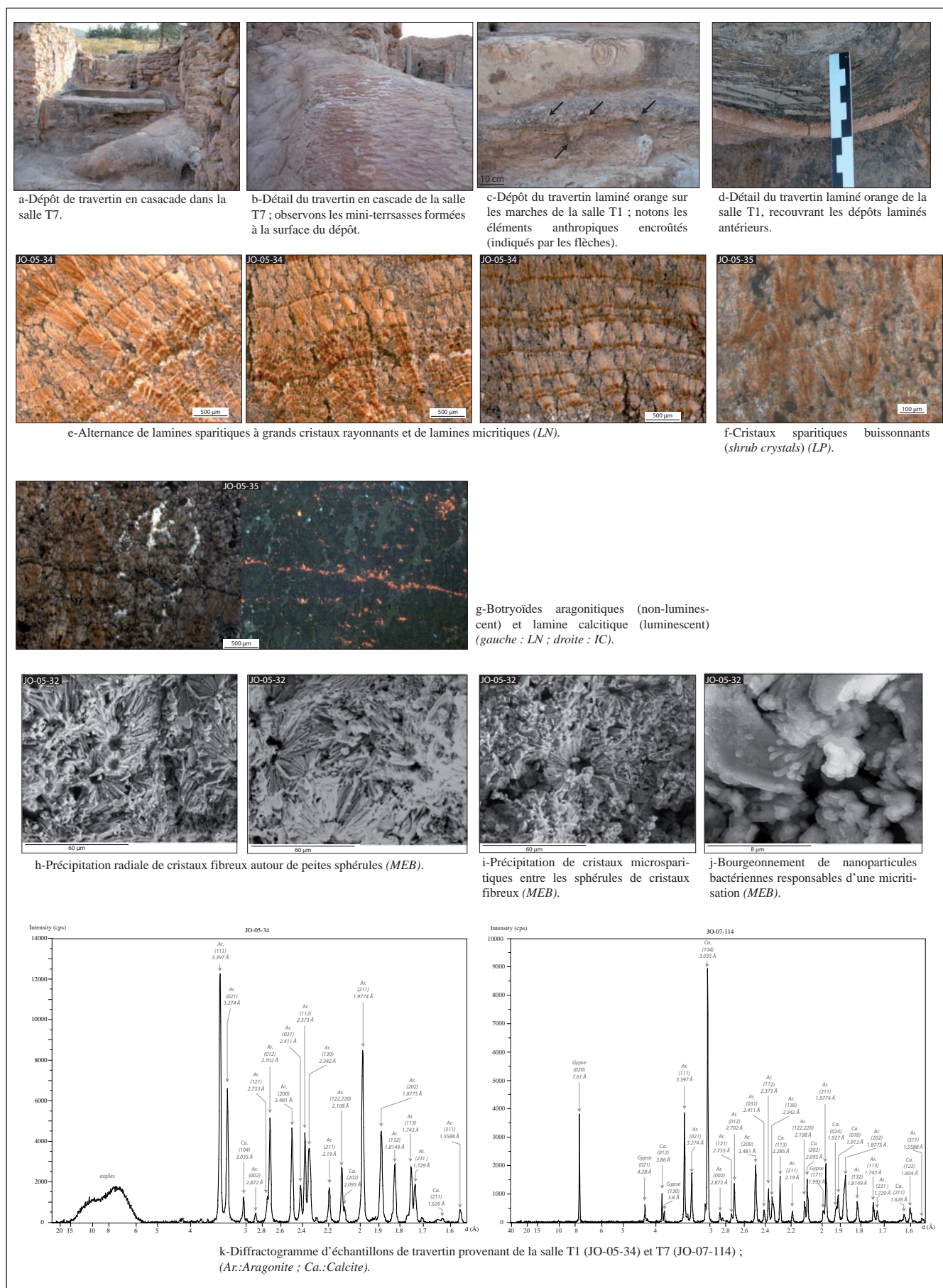


Figure B.74. Planche pétrographique du faciès E défini dans les thermes antiques de Jebel Oust ; voir les commentaires dans le texte.

B.III.2.1.7. Les travertins de canalisation : le faciès F (planche : Fig. B.75).

Identifiés dans certaines canalisations de l'édifice thermal, ces travertins présentent majoritairement un faciès finement laminé et peuvent présenter une puissance relativement importante, d'une dizaine de centimètres d'épaisseur dans la canalisation d'eau chaude de la salle T5 lors des phases I et II des thermes (Fig. B.75a), dans le tuyau d'alimentation de la salle T23 (Fig. B.75b) ou dans un tuyau d'alimentation de la salle T6 (Fig. B.75c). A l'inverse, ce type de travertin peut être très réduit, comme dans la canalisation faite d'*imbrices* et couverte en bâtière, traversant la salle T24 (vestiaire) des thermes (Fig. B.75d).

Les analyses microscopiques ont révélé une part dominante des cristaux d'aragonite sous la forme de botryoïdes (Fig. B.75f ; détail : Fig. B.75g). Ces botryoïdes aragonitiques sont souvent agencés en couronnes elles-mêmes surmontées de structures à croissance colonnaire comprenant des traces d'oxydes de fer (Fig. B.75e). Les observations au MEB ont permis d'identifier les fibres aragonitiques cristallisées dans un ciment micritique (Fig. B.75h), ordonnées et unidirectionnelles (Fig. B.75i) et qui forment les structures botryoïdales (Fig. B.75j) susceptibles de côtoyer des cristaux sparitiques calcitiques (Fig. B.75k et B.75l).

L'analyse DRX d'un échantillon provenant d'une canalisation de la salle T5 (JO-08-12) montre la présence des deux formes de carbonate de calcium, aragonite et calcite. L'analyse des isotopes stables de l'oxygène et du carbone réalisée sur deux échantillons de travertin colmatant une canalisation de T5 (JO-10-11, n=17 ; JO-10-12, n=7) donne une valeur moyenne en $\delta^{18}\text{O}$ de -11,72 ‰ PDB et en $\delta^{13}\text{C}$ de 1,96 ‰ PDB.

Les travertins préservés dans les canalisations des thermes présentent un faciès à lamination répétitive, traduisant une précipitation homogène du carbonate, où l'aragonite est dominante par rapport à la calcite, sous la forme de cristaux fibreux bien développés (euhédraux), témoignant d'une précipitation carbonatée par une eau très chaude, souvent supérieure à 40°C.

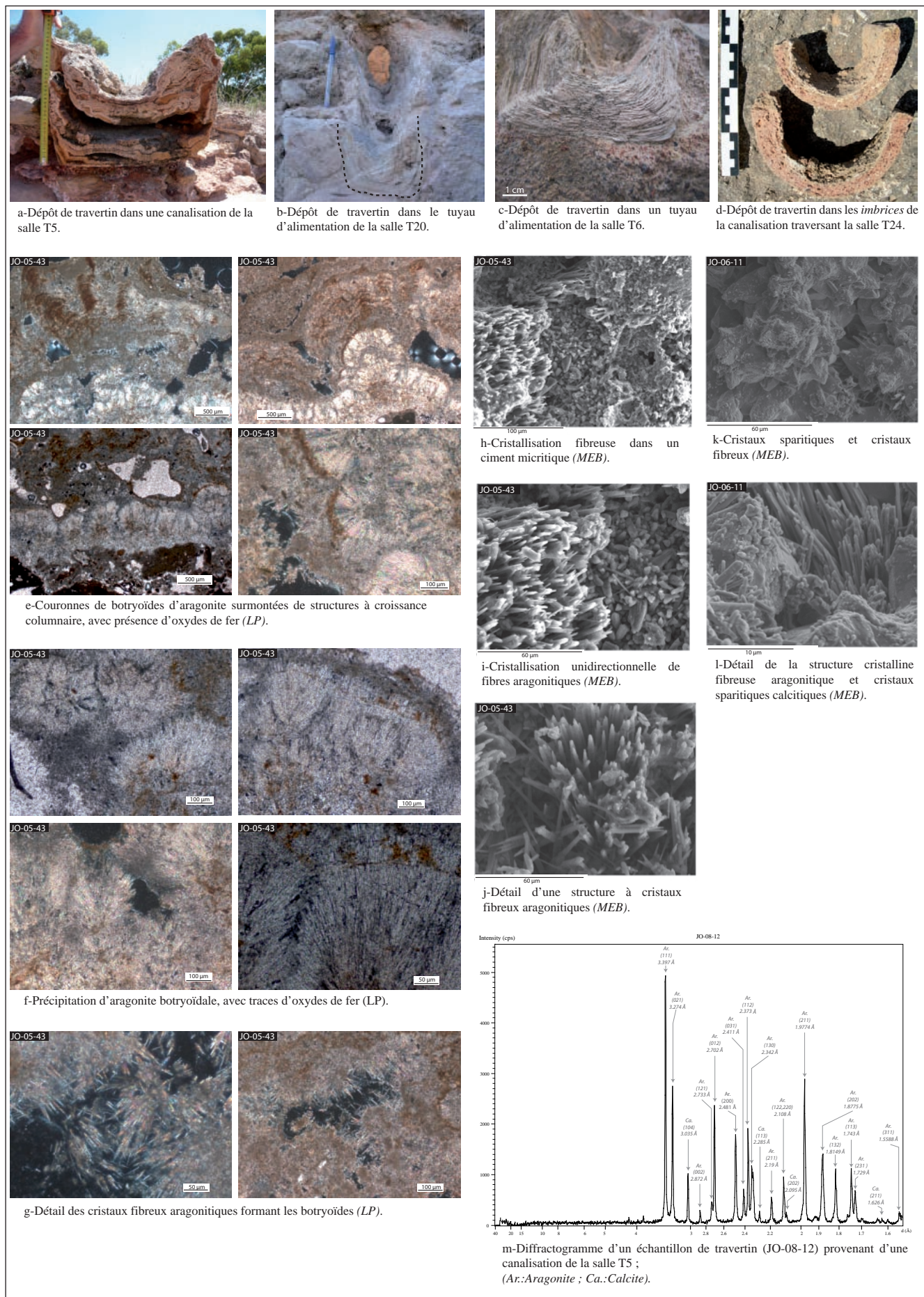


Figure B.75. Planche pétrographique du faciès F défini dans les thermes antiques de Jebel Oust ; voir les commentaires dans le texte.

Synthèse de la diversité de faciès dans les thermes antiques de Jebel Oust.

La nomenclature pétrographique, minéralogique et géochimique propre aux travertins anthropiques des salles thermales de Jebel Oust permet de distinguer un certain nombre de faciès principaux correspondant chacun à une nature et à une fonction des pièces dans lesquelles ils sont observés (Fig. B.76). Les signatures isotopiques de chaque faciès sont présentées dans un diagramme $\delta^{18}\text{O}/\delta^{13}\text{C}$ (Fig. B.77).

Les travertins de faciès A caractérisent les salles thermales alimentées régulièrement en eau thermique et qui servent de piscines chaudes à immersion (*natatio*) dans le circuit thermal emprunté par le baigneur.

Le travertin de faciès B caractérise également une *natatio*, la salle rectangulaire T5, dont le grand bassin central, contrairement aux bassins T5 et T9, est à ciel ouvert. La présence d'éléments microbiologiques et les valeurs isotopiques du $\delta^{18}\text{O}$ et du $\delta^{13}\text{C}$ plus élevées d'environ 1 ‰ par rapport aux valeurs de T1 et T9, traduisant une évaporation plus importante, une eau plus tiède (refroidissement plus important) et une activité photosynthétique présente, font état d'un environnement de dépôt nettement différent des salles T1 et T9. La salle se présentait alors comme un péristyle dont l'espace central était entièrement occupé par la piscine. L'enquête géoarchéologique vient ici confirmer une hypothèse suggérée par des analyses comparatives. Dans les thermes d'Aquae Flavianae (Fig. B.8) dont le plan présente de grandes similitudes avec celui des thermes de Jebel Oust, la grande piscine rectangulaire, compte tenu de sa morphologie, ne pouvait pas être couverte et était donc tiède, elle aussi. De même il est presque certain que le plus grand des bassins des thermes d'Hammat Gader (Vallée du Yarmuk, Fig. B.78) qualifié de piscine tiède par deux inscriptions trouvées in situ était lui aussi à ciel ouvert dans sa partie centrale (Broise, 2003, p. 225).

Les travertins de faciès C caractérisés par une structure spongieuse et des valeurs élevées en $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$, traduisant un phénomène important d'évaporation et de refroidissement de l'eau, reflètent des salles où l'eau thermique stagnait à ciel ouvert, servant de réservoirs de refroidissement de l'eau chaude. Il s'agit des salles localisées dans la partie sud de l'édifice (T19, T20 et T23) et des salles T11, T12 et T13, situées au cœur des thermes. Ces deux séries de bassins à ciel ouvert représentent une gestion de l'eau thermique à l'intérieur du système thermal de Jebel Oust.

Les travertins de faciès E, avec leur cortège de lamines aragonitiques et des faibles valeurs en $\delta^{18}\text{O}$ (très négatifs par rapport au $\delta^{18}\text{O}$ des faciès A, B et C) traduisant une eau de précipitation chaude, ainsi que leur contenu en fragments de terre cuite provenant de l'architecture thermique et leur position stratigraphique, sont interprétés comme se déposant dans certaines pièces laissées à l'abandon, certaines étant hors d'eau lors du fonctionnement des thermes (T2, T3, T7), et lorsque l'eau thermique n'est plus gérée efficacement.

Estimation de températures de dépôt :

En utilisant l'équation (Hays et Grossman, 1991 ; Pentecost, 2005) et la valeur mesurée du $\delta^{18}\text{O}$ actuel de l'eau thermale de Jebel Oust ($\delta^{18}\text{O}_w = -5,95 \text{ ‰ SMOW}$), il est possible d'estimer des températures de dépôt des travertins, en considérant que la précipitation de la calcite s'effectue à l'équilibre isotopique (distance de 100 m depuis la source, taux de dépôt relativement faible, vitesse de précipitation faible). Les valeurs moyennes de température ainsi obtenues pour les grandes salles thermales de Jebel Oust (Fig. B.76) sont **28°C pour la salle T1**, **29°C pour T9**, et **23,5°C pour T5**. Pour les salles situées dans la partie sud de l'édifice, les températures moyennes calculées sont de **19°C pour la salle T19**, de **22°C pour T20** et de **19°C pour T23**. Les valeurs moyennes obtenues pour les salles T11, T12 et T13 sont respectivement de **19°C, 21°C et 20°C**.

S'il ne s'agit que d'estimations, nous retrouvons néanmoins à travers les températures calculées **le dessin d'un circuit et d'une gestion thermique alliant bassins chauds (T1 et T9), bassins tièdes (T5) et réservoirs de refroidissement (T11, T12 et T13 et T19, T20 et T23).**

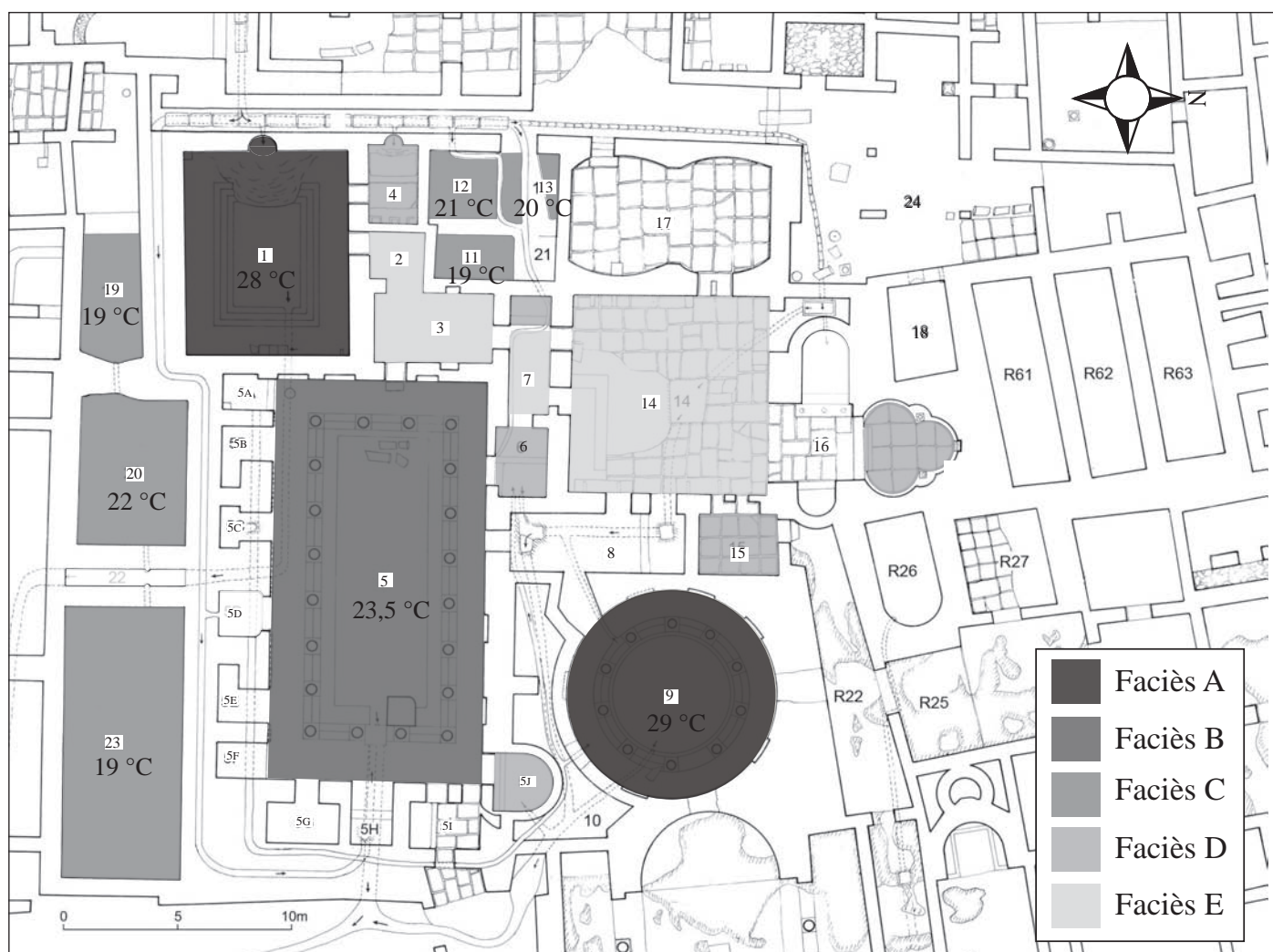


Figure B.76. Répartition spatiale des faciès des travertins anthropiques dans les salles thermales de Jebel Oust et estimation des températures de dépôt associées.

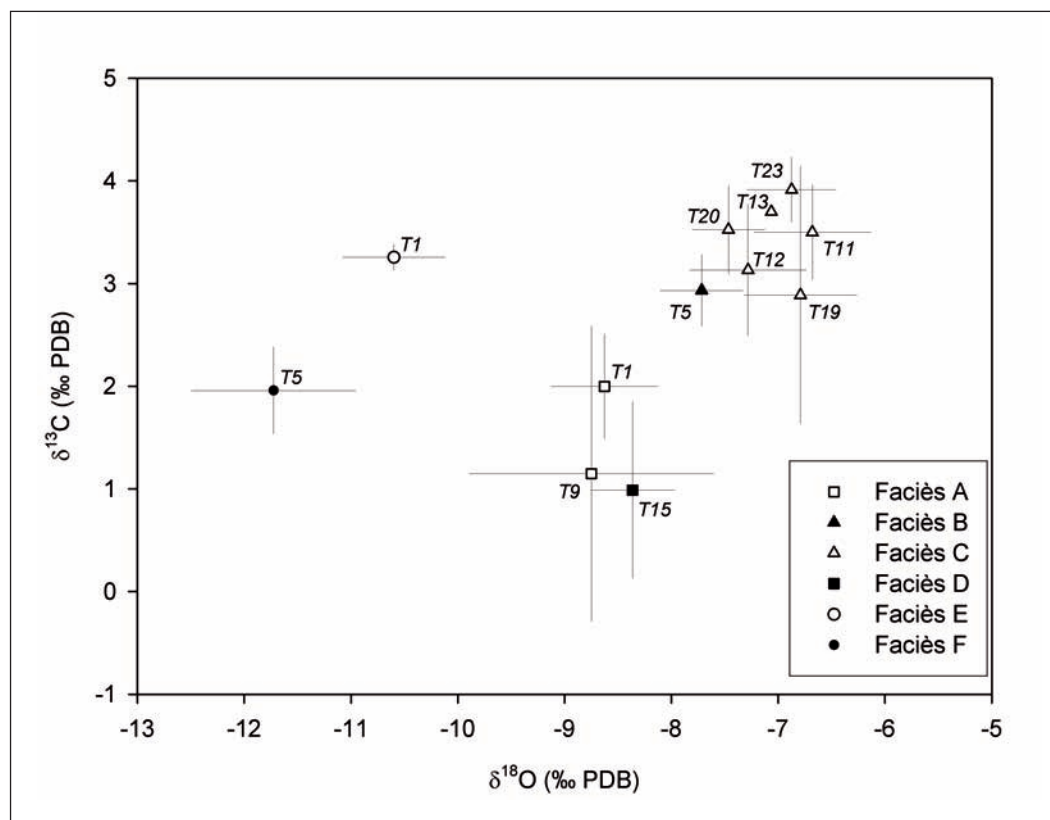


Figure B.77. Signatures isotopiques (carbone et oxygène) des faciès des travertins anthropiques des thermes antiques de Jebel Oust ; la moyenne et l'écart-type sont représentés, ainsi que les salles thermales correspondantes.

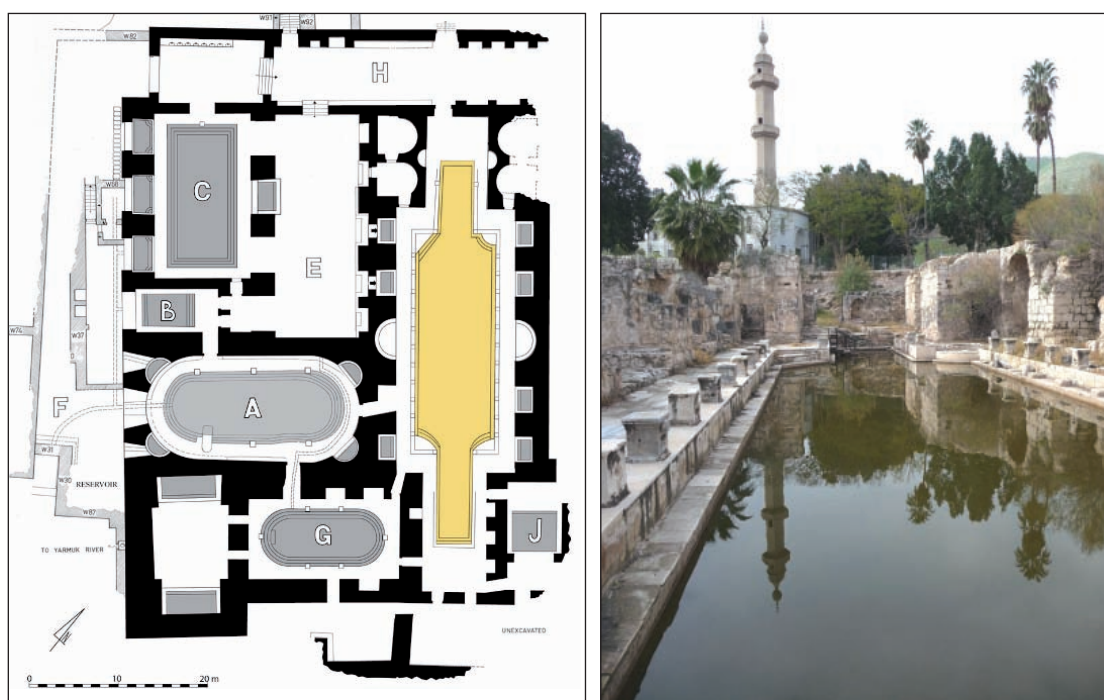


Figure B.78. Plan des thermes de Hammat Gader (phase II, fin II^e/début III^e s. ?) ; à droite : vue du grand bassin tiède, à ciel ouvert, des thermes (Photo : H. Broise).

B.III.2.2. L'analyse d'une séquence laminée : l'apport de l'analyse d'un travertin à la chronologie relative de la salle T1.

Au sein du complexe thermal antique de Jebel Oust, les indices chronologiques demeurent rares ; les seules stratigraphies archéologiques sont situées en grande partie dans le vestiaire (T24). Epargnées par les fouilles anciennes de M. Fendri, elles ont permis d'établir la trame chronologique de l'évolution de l'édifice. Les séquences de travertin déposées et préservées à l'intérieur même des piscines thermales représentent ainsi de puissantes archives sédimentaires, permettant de proposer des indices chronologiques complémentaires aux datations classiquement utilisées en archéologie. Nous avons vu, précédemment, le problème spécifique que pose l'interprétation de la lamination constituant la structure sédimentaire de certains dépôts de travertins *s.l.* (cf. A.I.3.1), où le caractère saisonnier et/ou annuel des doublets de lamines a pu être mis en lumière par plusieurs travaux.

La séquence de travertin préservé sur les marches de la piscine T1 des thermes, a été analysée à l'aide d'une méthode semi-automatisée de comptage du nombre et de l'épaisseur des lamines, méthode exposée précédemment (cf. A.I.V).

B.III.2.2.1. Localisation et stratégie d'échantillonnage.

L'échantillon de travertin laminé (JO-05-38) a été prélevé dans le dépôt de travertin qui recouvre les marches et contremarches de la piscine T1 des thermes antiques de Jebel Oust. Plus précisément, l'échantillon provient du travertin recouvrant la marche inférieure de la piscine, dans l'angle sud-ouest de la salle (Fig. B.78). Le dépôt de travertin, d'une épaisseur de quelques centimètres sur la marche (surface horizontale), est beaucoup plus dilaté sur la contremarche (surface verticale), puisqu'il atteint une puissance totale d'environ 15 cm ; c'est précisément à cet endroit que cette séquence a été analysée.

L'échantillon analysé appartient au **faciès A**, parmi les faciès que nous avons définis dans les thermes antiques de Jebel Oust (cf. B.III.2.1). Il présente une (micro)lamination de type **alternée et anisopaque** (Pentecost, 2005, p.37, ou cf. A.IV.3.1 de ce manuscrit), avec une succession de doublets constitués chacun d'une lamine claire sparitique à microsparitique et d'une lamine sombre micritique (Fig. B.79).

Cet encroûtement de la salle T1, recouvrant les marches et contremarches du grand bassin central, appartient à une phase relativement tardive des thermes, datée du début du V^e s. apr. J.-C., lorsque ceux-ci sont annexés par la *villa* lors de la **Phase IV des thermes**.

L'acquisition du signal est réalisée dans le sens de croissance des lamines du travertin qui est venu mouler la marche et la contremarche, c'est-à-dire depuis la périphérie de la salle T1 jusqu'au centre de la pièce (bassin central). De petites cassures, postérieures au dépôt, sont présentes au sein du travertin et sont responsables de

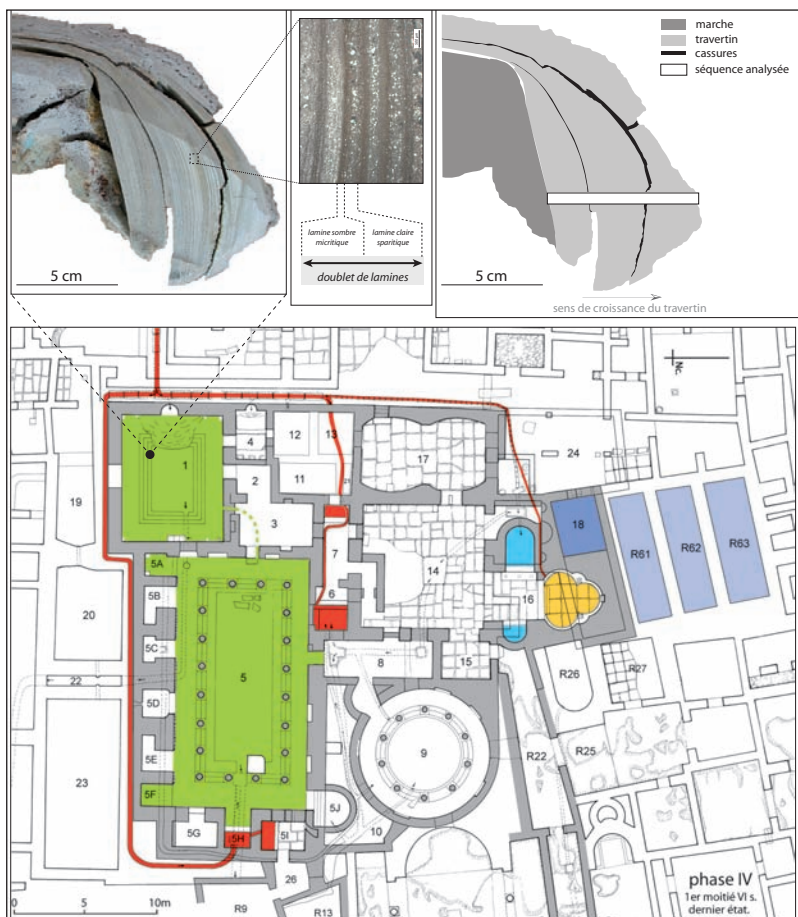


Figure B.79. Localisation de l'échantillon JO-05-38 sur le plan de la phase IV des thermes ; en haut : caractérisation de l'échantillon laminé et du doublet de lamines (voir les détails dans le texte).

hiatus dans la séquence sédimentaire. Fort heureusement, ce problème pourra être contourné lors de l'acquisition des données, par un balayage multiple le long de la séquence qui permettra d'éviter ces hiatus présents dans la séquence. Pour une acquisition optimale, le balayage s'effectue perpendiculairement aux lamines.

B.III.2.2.2. Analyse semi-automatisée de la séquence laminée.

• Acquisition des données et d'un signal brut :

La première étape de l'analyse consiste à extraire un signal représentatif de la séquence laminée à travers l'analyse des variations de niveaux de gris de chaque pixel de l'image (densité de gris) afin de faire ressortir l'alternance entre les lamines claires et les lamines sombres. Le principal obstacle à cette première étape réside dans la présence de discontinuités dans la séquence laminée, dues à quelques micro-cassures au sein de l'échantillon prélevé. Pour pallier à ce problème, le balai d'acquisition sera placé de manière optimale (cf. A.IV). Pour cet échantillon, trois fenêtres de balayage ont été nécessaires pour couvrir l'ensemble de la séquence (Fig. B.80), afin d'éviter les hiatus engendrés par les cassures présentes dans l'échantillon. Ainsi, le balayage s'effectue sur une fenêtre de travail d'une longueur de 551 pixels et d'une largeur 10 pixels, avec une résolution d'acquisition de 0,1 pixel/mm. Cette acquisition de données équivaut ainsi à un balayage effectué sur une séquence de sédiment longue de 55,1 mm et large de 10 mm.

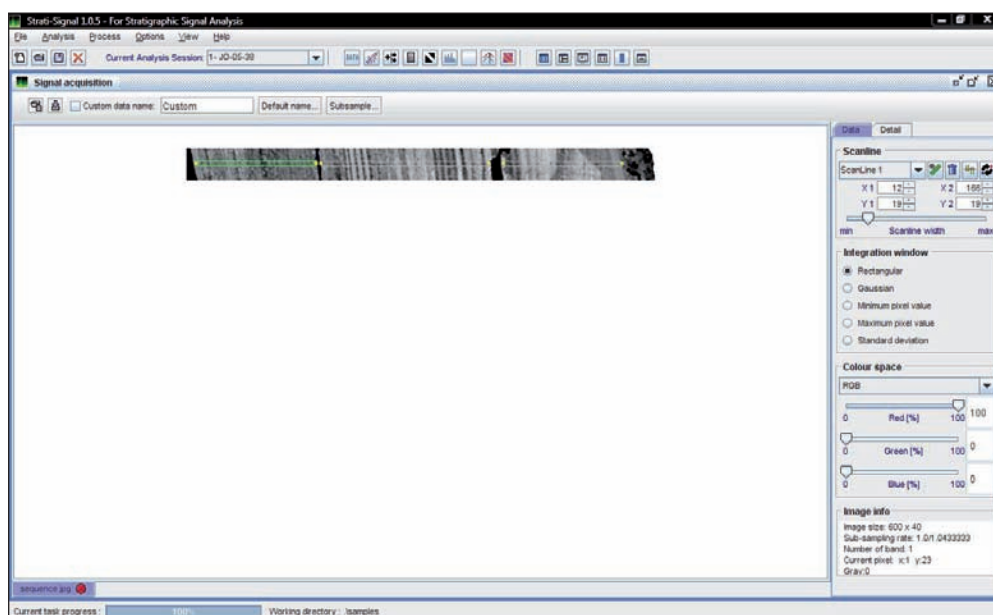


Figure B.80. Acquisition du signal sur l'échantillon laminé JO-05-38 de la salle T1 des thermes (capture d'image depuis le logiciel Strati-Signal).

Le signal obtenu par l'analyse des variations de niveaux de gris le long de la séquence représente un signal brut (Fig. B.81) qui doit ensuite faire l'objet d'un traitement afin d'extraire le véritable signal correspondant à la lamination claire et sombre du sédiment.

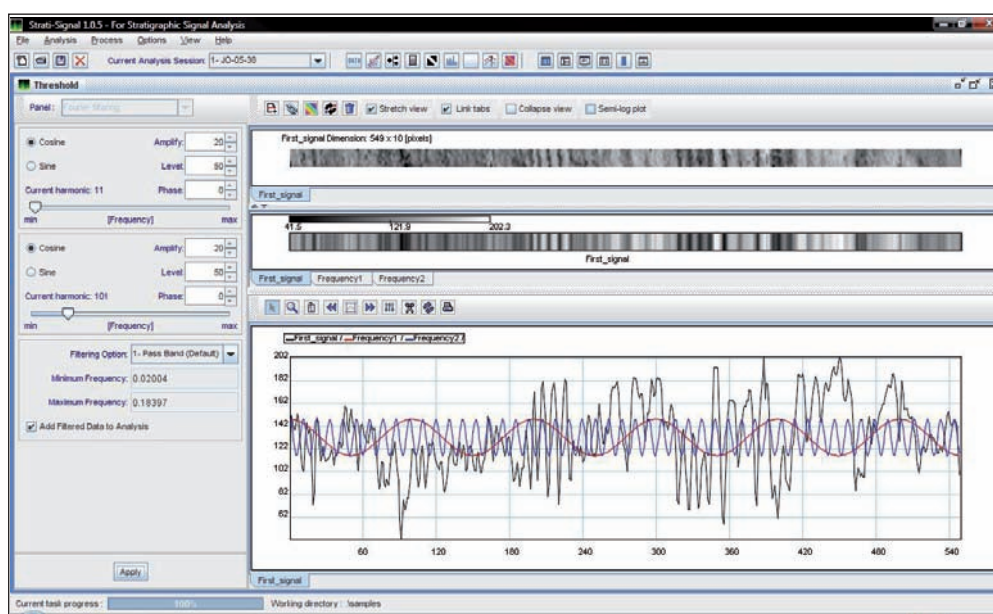


Figure B.81. Signal brut obtenu par l'analyse des variations de niveaux de gris ; composante en rouge : basse-fréquence, bleu : haute-fréquence, noir : moyenne-fréquence (capture d'image depuis le logiciel Strati-Signal).

• Transformation du signal brut en signal filtré :

Le signal brut obtenu par l'analyse de la variation de la densité de gris le long de la séquence sédimentaire comprend plusieurs tendances qui composent ainsi le « signal complet » :

- une composante « basse-fréquence », qui correspond à la tendance générale du signal ;
- une composante « moyenne-fréquence », représentant la lamination du sédiment ;
- une composante « haute-fréquence », correspondant au « bruit » de l'analyse.

La transformation du signal brut en un signal filtré, à l'aide d'analyses de Fourier effectuées automatiquement par le logiciel, permet d'extraire la tendance générale (c.-à-d. la composante « basse-fréquence ») et les fluctuations à haute-fréquence (bruit du signal, très faible ici), afin de ne travailler que sur le signal représentant la lamination propre, c'est-à-dire la composante « moyenne-fréquence ».

Le **signal filtré** ainsi obtenu, correspondant à la variation de la lamination, c'est-à-dire à la succession de lamines claires et de lamines sombres (Fig. B.82). C'est à partir de ce signal filtré, et uniquement à partir de celui-ci, que le comptage des lamines ainsi que l'analyse de l'épaisseur de chacun des doublets de lamines doivent être effectués.

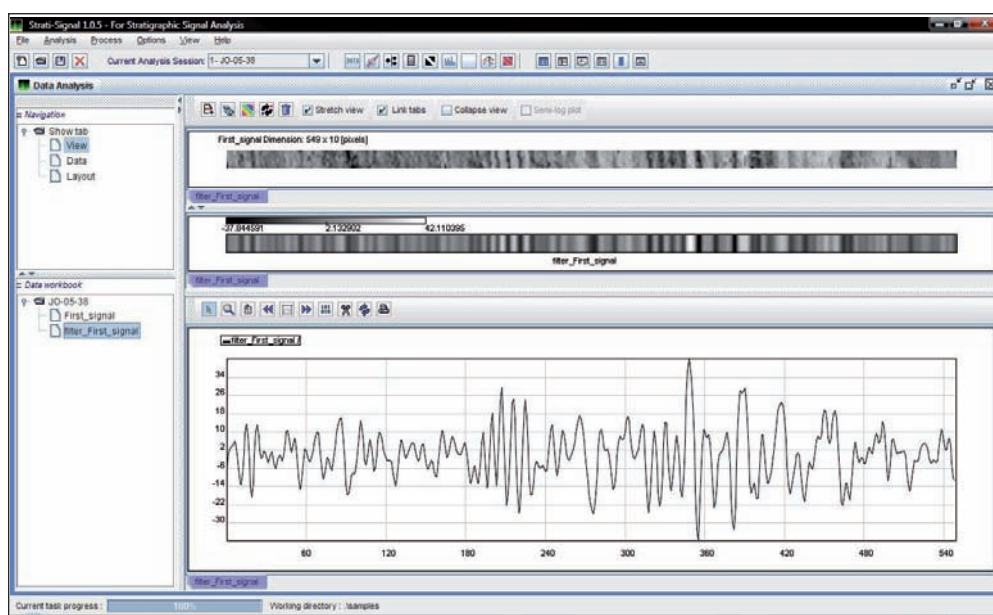


Figure B.82. Signal filtré reflétant la lamination du travertin (capture d'image depuis le logiciel Strati-Signal).

• Détermination du nombre de lamines de la séquence :

L'extraction du signal correspondant à la lamination du sédiment permet d'obtenir la courbe de variation de la densité de gris le long de la séquence faisant ressortir l'alternance entre les lamines claires et les lamines sombres.

A partir de cette courbe, il est possible de déterminer automatiquement le nombre de lamines claires et le nombre de lamines sombres qui constituent la séquence sédimentaire. Pour le cas de l'échantillon JO-05-38, il a été déterminé 44 lamines sombres/micritiques et 43 lamines claires/microsparitiques (Fig. B.83). Ce résultat correspond à un nombre de **43 doublets**, chacun des doublets étant composé d'une **lamine sombre/micritique** et d'une **lamine sombre/microsparitique**.

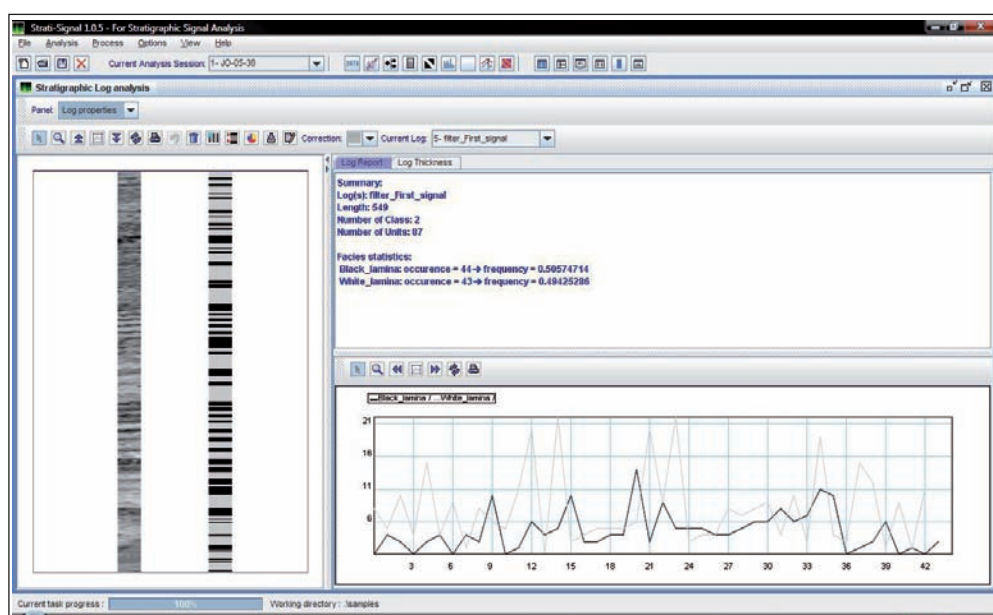


Figure B.83. Détermination du nombre de lames claires et sombres pour la séquence de l'échantillon de travertin (capture d'image depuis le logiciel Strat-Signal).

B.III.2.2.3. Une période d'utilisation minimale de la salle T1 de 43 ans.

Nous avons expliqué les particularités spécifiques liées au caractère laminé des travertins et des tufs calcaires (cf. A.I.3.1). Le caractère annuel de cette lamination a pu être mis en évidence sur quelques sites mondiaux, comme c'est le cas pour les dépôts du site de Shirokawa, au Japon (Kano *et al.*, 2003), du site de Shimokura, également au Japon (Kawai *et al.*, 2006), et du site de Deinschwanger, en Allemagne (Arp. *et al.*, 2001). Cette hypothèse de l'annualité du doublet de lames a également été utilisée pour des études de cas archéologiques, tels que les aqueducs antiques de Nîmes (Fabre et Fiches, 1986) et de Fréjus (Bobée *et al.*, 2010 ; Dubar 2006a, 2006b) et est retenu également dans le cas de Jebel Oust avec comme principal facteur de contrôle les variations climatiques saisonnières.

En effet, le climat actuel de la région de Jebel Oust, en particulier les valeurs de pluviométrie mensuelle, montre clairement la saisonnalité forte des précipitations régionales (cf. B.I.2.2). **Deux saisons** se distinguent nettement, **une saison humide et une saison sèche**, une caractéristique typique d'un climat méditerranéen. Ces variations climatiques contrôlent pleinement le fonctionnement de la source chaude de Jebel Oust (cf. B.I.3) ; le modèle hydrogéologique de cette source montre parfaitement l'influence directe des variations des précipitations sur le débit de la source.

Lors des phases pluvieuses, le débit est plus fort du fait d'une pression plus forte exercée sur la branche ascendante du système ; à l'inverse, lors des périodes sèches, le débit est moindre, et, en conséquence, la température moins élevée. Ce contraste saisonnier, à l'origine des variations de débit de la source chaude, est très certainement à l'origine du contraste lithologique entre la lamine claire et la lamine sombre (c.-à-d. entre la lamine microsparitique et la lamine micritique), observé dans le travertin de la salle T1 des thermes antiques de Jebel Oust.

En acceptant l'hypothèse de l'annualité du doublet de lamines (un doublet est formé en un an), la séquence sédimentaire de l'échantillon JO-05-38, présentant un nombre de 43 doublets de lamines, correspond à une période de dépôt de 43 années :

Echantillon JO-05-38 (salle T1)

[1 doublet de lamines = 1 an]

43 doublets = 43 ans

L'échantillon JO-05-38 provenant du travertin qui se développe dans la salle T1 lors de la phase IV des thermes (datée du début du V^e siècle de notre ère) présente un enregistrement sédimentaire de 43 doublets de lamines successifs. Ce caractère confère à la pièce T1 une durée minimale d'utilisation de 43 ans, au sein de cette phase chronologique.

B.III.2.2.4. Un signal paléohydrologique.

Le contexte de la salle T1 lors de la phase IV des thermes, correspondant aux travertins étudiés par le biais de l'échantillon JO-05-38, est favorable pour aborder une approche paléoenvironnementale à partir de l'étude de la lamination du sédiment. En effet, lors de cette phase IV, la salle T1 est alors utilisée comme réservoir de stockage de l'eau thermale, lorsque les thermes deviennent privés, annexés par la *villa*. L'eau thermale, qui arrive directement en T1 depuis l'aqueduc thermal recouvert par des dalles, présente alors une « gestion minimum » ; de ce fait, la formation du travertin sur les marches de T1 n'est pas soumise, ou très peu, à une gestion anthropique. De plus, nous souhaitons rappeler que la salle T1 est couverte par un toit, ce qui empêche tout mélange de l'eau thermale avec des eaux pluviales.

L'analyse de l'épaisseur des 43 doublets de lamines constituant la séquence (lamines claires et lamines sombres) montre une certaine variabilité (Fig. B.84). Les lamines claires (~ 0,81 mm) sont en moyenne plus épaisses que les lamines sombres (~ 0,48 mm). Il apparaît également que les variations d'épaisseur des deux types de lamine évoluent parallèlement, avec une amplitude similaire, évoquant une certaine cyclicité. Ces variations de l'épaisseur des doublets reflètent une variabilité de la précipitation du carbonate qui, en sus de la variation saisonnière période humide/période sèche, témoigne d'une certaine cyclicité hydrologique - variations du débit en lien avec les paramètres climatiques - de la source chaude à l'échelle pluri-annuelle.

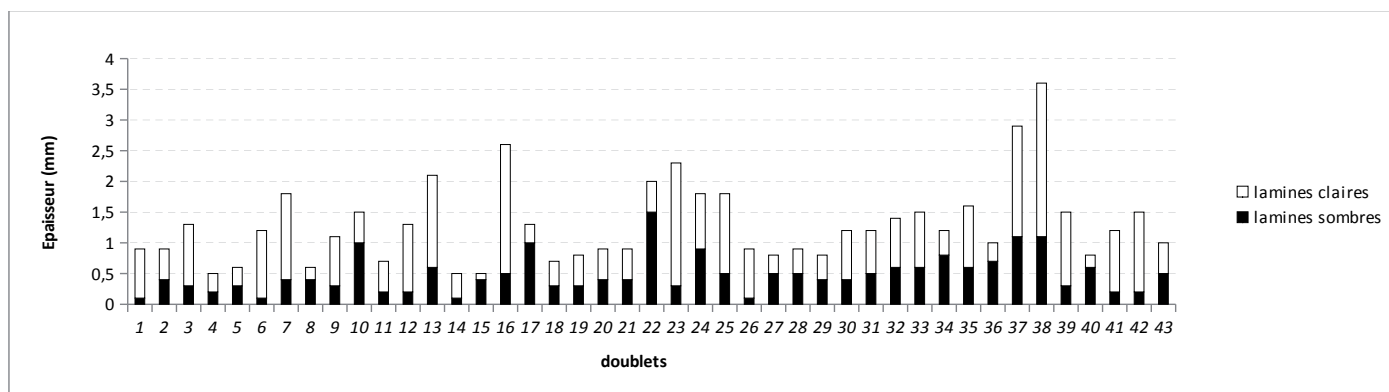


Figure B.84. Variations d'épaisseur des lamines claires et sombres le long de la séquence sédimentaire (JO-05-38, salle T1).

L'analyse des isotopes stables effectuée sur 5 doublets de lamines, dans le sens de croissance du travertin (de 5-38_01 = lamine claire à 5-38_10 = lamine sombre) montre une anti-corrélation entre les valeurs du et du (Fig. 85). Les valeurs en $\delta^{18}\text{O}$ des lamines claires sont plus faibles que celles des lamines sombres, reflétant une eau de précipitation plus chaude, qui témoigne que la lamine claire du doublet se forme lors de la saison humide, lorsque la température de la source est plus élevée, liée à un débit plus élevé (cf. B.I.3), ce qui entraîne une cristallisation sparitique du carbonate. Le $\delta^{13}\text{C}$ montre une variabilité à l'échelle de la lamine, avec des lamines sombres caractérisées par des valeurs plus faibles que les lamines claires, témoignant d'une certaine activité microbienne, probablement responsable de la cristallisation micritique lors de la saison sèche marquée par un débit plus faible de la source chaude

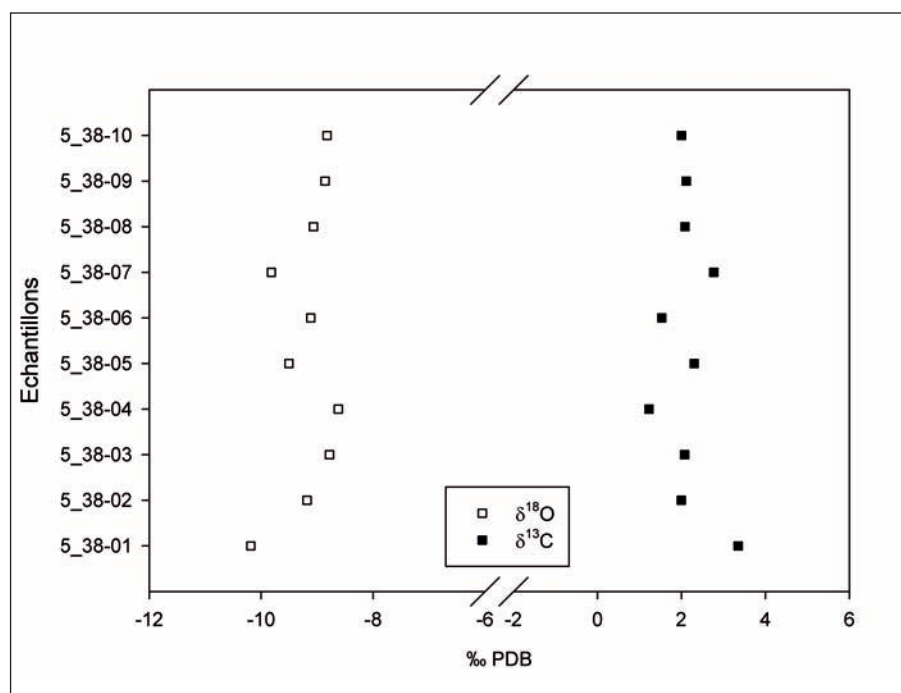


Figure B.85. Évolution des valeurs du $\delta^{18}\text{O}$ et du $\delta^{13}\text{C}$ de l'échantillon JO-05-38 (5 doublets de lamines claires + lamines sombres).

B.III.2.3. L'histoire *géoarchitecturale* d'une salle : une confrontation de l'analyse architecturale et de l'étude géoarchéologique de la salle T6.

La salle T6, de taille relativement réduite au regard des grandes salles qui lui sont mitoyennes (en particulier la grande piscine T5), possède néanmoins une place primordiale au sein du fonctionnement général thermes antiques de Jebel Oust, tant par la situation centrale qu'elle occupe au sein de l'édifice que par sa nature et les différentes fonctions qu'elle connaît en parallèle de l'évolution chronologique des thermes. Son excellent état de conservation nous permet de retracer ici son histoire et son évolution, à travers une approche double et originale mettant en œuvre simultanément l'étude architecturale de la salle et l'analyse des dépôts de travertins préservés sur ses parois et dans les tuyaux qui l'alimentent. Cette dernière repose essentiellement sur l'étude du mur oriental de la salle (voir Fig. B.93), dont la conservation nous permet de mettre en lumière un certain nombre d'indices stratigraphiques témoignant de l'évolution relativement complexe de la salle, ainsi que sur l'étude des tuyaux utilisés pour son alimentation en eau.

L'analyse architecturale a permis de définir **cinq états successifs** de fonctionnement de la salle qui s'inscrivent parfaitement dans l'évolution chronologique de l'édifice thermal. Pour chacun de ces états sont associées la fonction spécifique de la salle T6 et la caractérisation des travertins déposés successivement dans cette pièce, par le biais d'analyses stratigraphiques, pétrographiques et géochimiques.

B.III.2.3.1. Les états 1 et 2 : un espace de circulation.

Les deux premiers états identifiés architecturalement rendent compte d'une pièce caractérisée par l'absence de bassin. La salle T6 occupe alors la fonction d'espace de circulation qui, dans un premier état (état 1), s'ouvrait à l'ouest sur la salle T7 des thermes et à l'est sur une salle étroite dont seuls subsistent les arrachements des murs nord et sud qui prolongent ceux de T6. Ce n'est sans doute que dans un second état (état 2) qu'une porte est percée dans la paroi nord de la salle. Cette porte, bien que bouchée par la suite, est bien visible ainsi que son seuil (en calcaire gris de Jebel Oust) du côté du *frigidarium* T14, dans le parement du mur sud de ce dernier qui est venu se coller contre le mur nord de T6.

L'absence d'alimentation en eau thermale lors des états 1 et 2 de fonctionnement de la salle T6 engendre à l'évidence l'absence de dépôt de travertins au sein de cette salle. Aucun enregistrement sédimentaire n'est ainsi contemporain des deux premiers états de fonctionnement. Les uniques témoins de ces deux premiers états de la salle T6 demeurent des témoins architecturaux.

B.III.2.3.2. Les états 3 et 4 : un bassin peu profond à alimentation double.

Les états suivants sont caractérisés par l'installation d'un bassin dans la salle T6. Dans un premier temps, il s'agit d'un petit bassin relativement peu profond, d'environ 90 cm de profondeur, qui occupe tout l'espace de la pièce, et qui bénéficie d'une double alimentation, à la fois en eau thermale et en eau douce. Pour réaliser ce

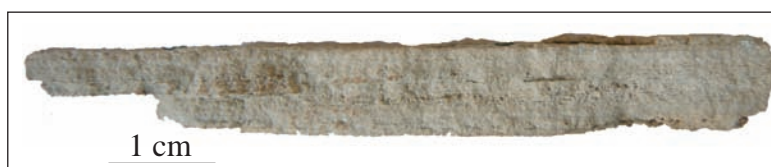
bassin, les trois portes de la salle ont été murées et une ouverture percée dans le mur sud, vers la salle T5, pour installer les emmarchements d'accès. Cette baie d'accès pratiquée dans le mur T5-T6 est relativement étroite, d'une longueur totale de 1,45 m, tandis que les emmarchements sont recouverts de plaques en calcite filonienne d'origine locale. Le sommet de la marche-margelle d'accès au bassin se situe à la cote de 123,76 m, soit 90 cm au-dessus du fond du bassin et 30 cm au-dessus du sol de la galerie de circulation nord de T5. Quant au fond du bassin, situé à la cote de 122,86 m, il était tapissé de dalles de calcaire gris, également d'origine locale.

- L'état 3 :

Lors de l'état 3, l'arrivée d'eau thermale dans le bassin de T6 constitue l'aboutissement de la canalisation qui, ceinturant l'édifice thermal au sud et à l'est, traverse ensuite l'espace de service T10 puis la salle T8. Encore conservée dans les parois est et ouest de T8, elle se présente sous la forme d'une canalisation maçonnée en béton de tuileau, de section rectangulaire, large de 14 cm et haute de 16 cm (voir sur Fig. B.87).

Le travertin déposé sur les parois du bassin lors de cet état, de quelques centimètres de puissance et qui s'élève jusqu'à la cote de 123,76 m, présente un faciès à lamination répétitive, caractérisé par une succession de fines lamines inframillimétriques calcitiques (Fig.86). L'analyse des isotopes stables sur un échantillon de travertins déposés sur la paroi orientale de T6 lors de l'état 3 (JO-10-30, n=8) montre une gamme de valeurs en $\delta^{18}\text{O}$ comprise entre -13,38 et -12,62 ‰ PDB, pour une moyenne de -13,09 ‰ et un écart-type de 0,28. La gamme de valeurs en $\delta^{13}\text{C}$ est comprise entre -1,03 et 0,74 ‰ PDB, avec une moyenne de -0,28 ‰ et un écart-type de 0,59.

Figure B.86. Echantillon de travertin montrant le faciès C1 (état 3) de la salle T6 des thermes.



Le travertin déposé lors de l'état 3 reflète une alimentation régulière du bassin en eau thermale, laquelle est mélangée à une eau douce responsable du déplacement des valeurs isotopiques vers des valeurs plus négatives en $\delta^{18}\text{O}$ et en $\delta^{13}\text{C}$ que des valeurs de travertins s.s.

- L'état 4 :

L'état 4 correspond à une réfection des deux canalisations d'alimentation, travaux qui n'affectent en rien le fonctionnement du bassin, les deux nouvelles conduites se situant au même niveau que les précédentes. Une conduite en terre cuite d'un diamètre interne de 11,5 cm est installée au détriment et à l'intérieur du canal maçonné qui acheminait l'eau thermale jusqu'alors (Fig. B.87). Quant à la conduite d'eau douce qui provenait de T8, elle est désaffectée au profit d'une nouvelle conduite, provenant cette fois de l'ouest, certainement de T7.



Figure B.87. Conduite en terre cuite alimentant en eau thermique la salle T6 lors de l'état 4, installée dans le canal maçonné de l'état 3.

Le travertin contemporain de l'état 4 recouvre stratigraphiquement le travertin de l'état 3 d'un dépôt d'épaisseur moyenne de deux centimètres, jusqu'à la cote de 123,76 m. Il présente un faciès poreux, à lamination diffuse, voire absente (Fig. B.88). L'observation microscopique révèle la présence d'organismes microbiens à croissance buissonnante et quelques éléments de nature biologique (Fig. B.89). L'analyse des isotopes stables sur un échantillon de travertins déposés sur le paroi orientale de T6 lors de l'état 4 (JO-07-121, n=6) montre une gamme de valeurs en $\delta^{18}\text{O}$ comprise entre -11,58 et -9,02 ‰ PDB, pour une moyenne de -10,41 ‰ et un écart-type de 0,95. La gamme de valeurs en $\delta^{13}\text{C}$ est comprise entre 0,68 et 2,04 ‰ PDB, avec une moyenne de 1,44 ‰ et un écart-type de 0,46.

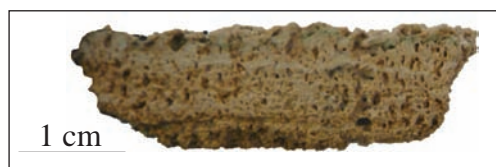


Figure B.88. Echantillon de travertin montrant le faciès C2 (état 4) de la salle T6 des thermes.



Figure B.89. Structures à croissance microbienne dans le travertin de l'état 4 de la salle T6.

Le travertin déposé lors de l'état 4 reflète une alimentation du bassin en eau thermique et une précipitation du carbonate où l'influence biologique est remarquée (*biological mediation*). L'eau thermique est mélangée avec de l'eau douce, en témoigne le déplacement du $\delta^{18}\text{O}$ et du $\delta^{13}\text{C}$ vers des valeurs négatives, à l'instar du travertin de l'état 3. Le développement de structures de nature biologique, ainsi que l'absence de lamination régulière d'origine physico-chimique, reflètent un hydrodynamisme différent de l'état antérieur, caractérisé par des conditions de dépôt relativement stable et une eau probablement davantage stagnante que lors de l'état 3.

B.III.2.3.3. L'état 5 : un bassin profond, à alimentation unique en eau thermique.

Cet état se distingue par un changement radical tant au niveau de la morphologie que de la fonction du bassin. L'accès s'effectue désormais à partir de la pièce T7 ; l'ouverture T6-T5 est murée et la porte T6-T7 est rouverte. Le bassin originel est partiellement comblé à l'ouest de la pièce sur une largeur de 90 cm et l'espace résiduel est alors dallé de plaques de calcaire. En deçà de cet espace un nouvel emmarchement d'accès au nouveau bassin est construit, dont la marche-margelle est faite de briques et la marche basse de briques et de blocs en calcaire. La profondeur du bassin est ainsi portée à 1,30 m depuis la marche-margelle, soit 40 cm de plus que dans les états précédents (états 3 et 4). Le bassin est alors alimenté uniquement et directement par de l'eau thermique provenant de la conduite longeant l'édifice thermal à l'ouest et dont l'installation condamne les bassins T13 et T21, au VI^e s.. Cette canalisation (Fig. B.90) ne débouche à l'air libre qu'au niveau de la salle T7, après avoir traversé le mur T21-T7. Elle devait ainsi acheminer l'eau à température maximale. Après avoir franchi, en encorbellement, l'angle nord-ouest du bassin de T7, et cheminé au pied de la marche-margelle de celui-ci¹, elle longeait la paroi sud de la salle pour déboucher dans l'angle sud-ouest du bassin T6. Le tronçon de canalisation longeant la paroi sud est sommairement réalisé avec des dalles de récupération en calcaire local posées de chant. L'absence d'une rainure d'encastrement dans la paroi du mur prouve que la canalisation n'était pas couverte.



Figure B.90. Canalisation à l'air libre provenant de T7 et alimentant la salle T6 en eau thermique lors de l'état 5.

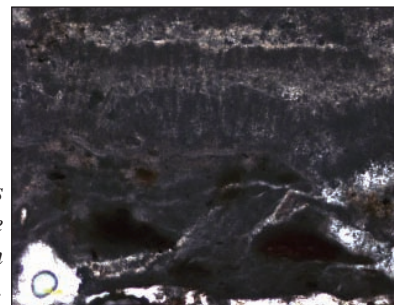
L'état 5 de la salle T6 voit se mettre en place un dépôt de travertin sur les parois du bassin, jusqu'à la cote de 124,15 m (= sommet de la marche-margelle), soit 40 cm au-dessus des travertins contemporains des états 3 et 4. Ce travertin présente un faciès finement laminé (Fig. B.91), caractérisé par une succession de lamines calcitiques dont l'observation microscopique révèle la nature exclusivement micritique ainsi que la présence de fantômes de structures rayonnantes (Fig. B.92). L'analyse des isotopes stables sur un échantillon de travertins déposés sur le paroi ouest de T6 lors de l'état 5 (JO-07-122, n=8) montre une gamme de valeurs en $\delta^{18}\text{O}$ comprise entre -9,73 et -7,84 ‰ PDB, pour une moyenne de -8,65 ‰ et un écart-type de 0,59. La gamme de valeurs en $\delta^{13}\text{C}$ est comprise entre -8,78 et 0,27 ‰ PDB, avec une moyenne de -4,58 ‰ et un écart-type de 3,30.

¹ A cet endroit se développe le travertin de cascade décrit précédemment dans le manuscrit (cf B.II.2.1).



Figure B.91. Echantillon de travertin montrant le faciès C3 (état 5) de la salle T6 des thermes.

Figure B.92. Structures micritiques à croissance rayonnante dans le travertin de l'état 4 de la salle T6.



Le travertin déposé lors de l'état 5 reflète une alimentation du bassin, alors plus profond que lors des états 3 et 4, en eau thermique et une précipitation du carbonate influencée par des processus physico-chimiques et biologiques. L'extrême variabilité et les faibles valeurs du $\delta^{13}\text{C}$ sont la conséquence d'une cristallisation secondaire de micrite et de la présence d'une certaine quantité de matière organique (végétaux, plantes) dans l'eau de précipitation du travertin. Ces caractéristiques reflètent une gestion différente de l'eau thermique, que souligne la canalisation d'alimentation en eau thermique lors de cet état, lors d'une phase au cours de laquelle l'entretien n'est probablement pas optimale.

B.III.2.3.4. Synthèse géoarchitecturale de l'histoire de la salle T6.

L'absence d'alimentation en eau thermique (et en eau douce) lors des états 1 et 2 de la salle T6 engendre l'absence de dépôts de travertin contemporains de ces deux états au sein de cette pièce, qui sert alors uniquement d'espace de circulation, caractérisé par l'absence de bassin. Ce n'est qu'au cours des états ultérieurs que la pièce T6 connaît l'installation d'un bassin et le dépôt de travertin associé. Aux trois états de mise en eau de la salle T6 (états 3, 4 et 5) correspondent trois travertins différents par leur faciès et leur signature géochimique. Représentées dans un diagramme $\delta^{18}\text{O}/\delta^{13}\text{C}$ (Fig. B.94), les valeurs isotopiques des travertins dessinent trois populations correspondant au faciès C1 (état 3), au faciès C2 (état 4) et au faciès C3 (état 5). La différenciation observée témoigne de la gestion différente mise en oeuvre pour l'alimentation en eau des bassins successifs de cette pièce, lors des trois derniers états de fonctionnement de la salle. D'abord l'installation d'un bassin peu profond, lors des états 3 et 4, connaît une double alimentation, à la fois en eau thermique et en eau douce. Lors de ces deux états, si le refroidissement de l'eau chaude s'effectue de manière similaire (mélange à une eau douce), les conditions hydrodynamiques du bassin sont différentes et certainement plus calmes lors de l'état 4. Un dernier état, l'état 5, voit la mise en place d'un bassin plus profond caractérisé par une alimentation unique en eau thermique et une gestion différente de l'eau, avec une canalisation qui chemine à l'air libre et une « qualité » différente de l'eau thermique.

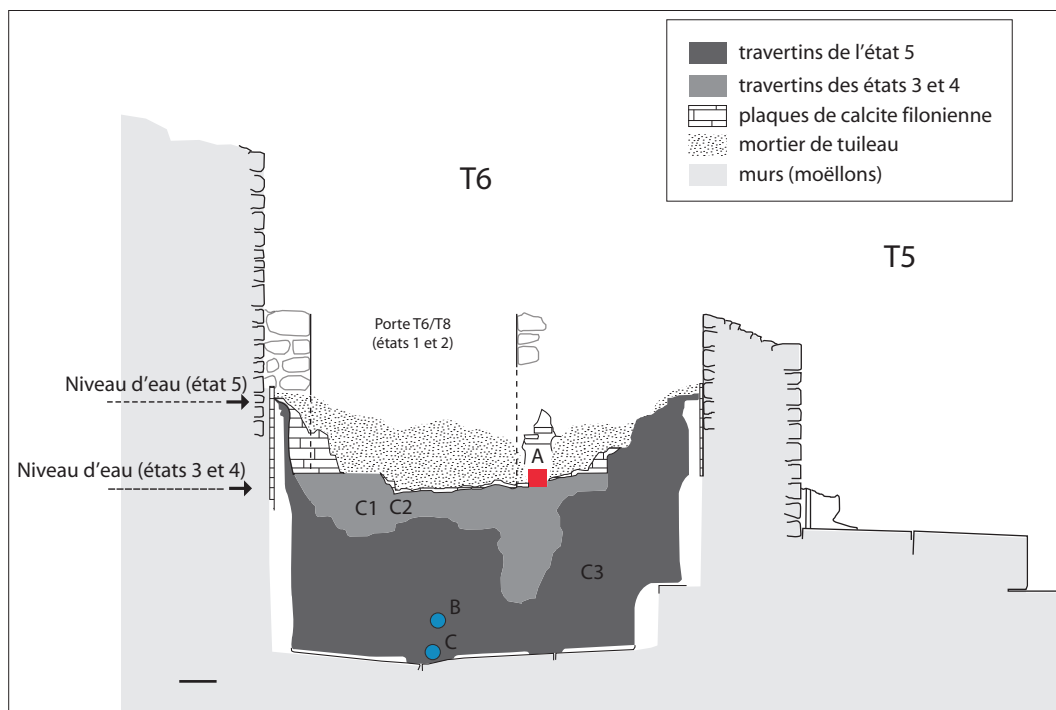


Figure B.93. Le mur oriental de la salle T6 des thermes ;
 en haut : vue depuis l'ouest (T7) du bassin de l'état 5 de T6 ;
 en bas : Profil en élévation des structures architecturales et des dépôts de travertin
 (A = alimentation en eau chaude des états 3 et 4, B et C = canaux de vidange).

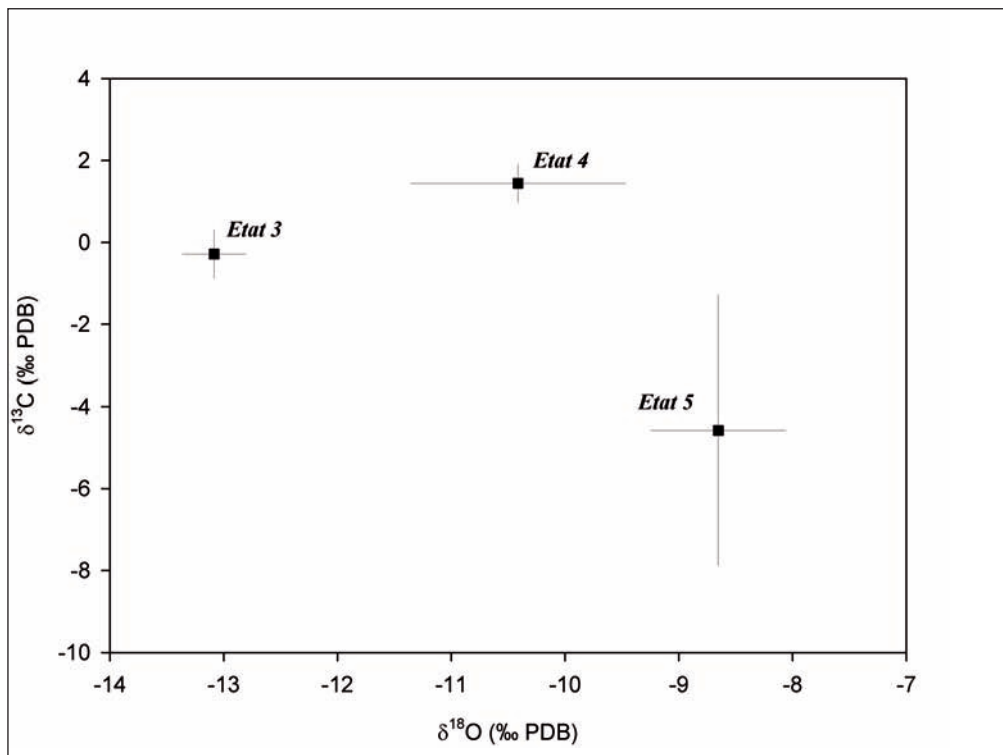


Figure B.94. Diagramme $\delta^{18}\text{O}/\delta^{13}\text{C}$ des valeurs isotopiques des faciès C1 (état 3), C2 (état 4) et C3 (état 5) de la salle T6 ; voir le commentaire dans le texte.

B.III.2.4. Mise en évidence de travaux de réfection dans les bassins par la lecture des travertins.

Le développement de puissants dépôts de travertins au sein de structures hydrauliques, bassins, réservoirs ou canalisations, est susceptible d'entraîner des dysfonctionnements ou tout du moins quelques désagréments dans leur utilisation. Un entretien de ces structures était donc nécessaire afin de pérenniser leur bon fonctionnement, par le biais de réfections ou, plus généralement, de restaurations. Des témoins directs d'une restauration ponctuelle sont identifiés dans les travertins déposés sur les murs de la salle T23 dans lesquels un certain nombre de traces de découpes franches sont repérées (Fig. B.95). Cette volonté ponctuelle de bûcher les travertins, éléments perturbateurs du fonctionnement correct des thermes, est à replacer dans un contexte plus général dans l'édifice visant à identifier des phases de réfection globales et régulières. Dans ce sens, l'analyse du bourrelet de travertin développé dans une salle centrale de l'édifice thermal, la salle T5, va se révéler déterminante. La lecture stratigraphique de ce bourrelet, qui s'est développé à la base des murs du portique, va mettre en évidence une certaine complexité dans l'histoire, la gestion et le fonctionnement de cette salle, et va nous permettre de mettre en évidence un certain nombre de ces réfections.



Figure B.95. Echancrures verticales dans le travertin de la salle T23 des thermes, témoignant d'une récupération du matériau et/ou d'un curage du bassin.

B.III.2.4.1. L'évolution chronologique de la salle T5.

L'évolution chronologique de la salle T5 est à mettre en parallèle avec la phasage chronologique des thermes de Jebel Oust, détaillé précédemment (cf. B.I.1.3). La morphologie de la salle T5 lors de la phase I des thermes nous est encore très mal connue. C'est le cas de la plupart des espaces thermaux pour cette phase I, qui ont été oblitérés par les phases successives. En revanche, la salle T5 représente l'un des uniques vestiges de la phase Ibis. C'était alors une grande piscine tiède, à ciel ouvert (cf. B.III.2.1), ceinte d'un portique et directement alimentée par la canalisation d'eau thermale provenant de la source chaude. Sa géométrie et sa fonction sont ensuite conservées à l'identique lors de la phase II des thermes, tandis qu'un *caldarium* (T9), de plan circulaire et couvert d'une voûte annulaire, est construit *ex-nihilo* au nord de T5.

La morphologie de la salle T5 va être modifiée lors de la phase III des thermes. En effet, lors de cette phase, qui correspond à une volonté d'augmenter la capacité d'accueil de l'édifice, un second *caldarium* (T1) est éri-

gé à l'angle sud-ouest du bâtiment ainsi qu'une série de petits bassins tièdes couverts. En T5, des pièces sont ajoutées dans la partie sud de la salle principale, dont deux sont des pédiluves (5A et 5F), deux ne contiennent pas de bassin (5B et 5E), et deux (5C et 5D) renferment encore quelques inconnues dans l'état actuel de nos recherches, mais sont certainement, tout du moins pour l'un (D), des petits bassins à usage individuel. Dans la partie nord de la salle, un bassin semi-circulaire (T5J) est également installé. En conséquence de ces aménagements, la conduite acheminant l'eau thermique et alimentant T5 est déplacée et vient maintenant longer la façade sud de l'édifice.

La phase IV, datée du début du V^e siècle et qui correspond à l'annexion des thermes par la *villa*, voit la fonction et la nature de la salle T5 changer. En effet, c'est certainement lors de cette phase que la salle T5 est abandonnée en tant que piscine thermique *stricto-sensu*, et voit son sol être recouvert par une nappe d'eau d'une vingtaine de centimètres. La salle T5 est alors utilisée, pour des raisons qui nous échappent encore (entretien trop compliqué ? besoin trop grand ?) comme réservoir servant à stocker de l'eau thermique. Le même phénomène est observé pour le *caldarium* à plan circulaire (T9). Lors de l'avant-dernier état de la phase IV, dans la première moitié du VI^e siècle, cette dernière est abandonnée en tant que *caldarium* ; son sol est alors recouvert d'une nappe d'eau d'une vingtaine de centimètres et elle remplit désormais la fonction de bassin de refroidissement alimentant l'un des bassins du *frigidarium* transformé en bassin tiède (T15).

C'est lors de cette dernière phase d'utilisation des thermes, la phase IV, lorsque le sol du portique de T5 se trouve ennoyé par l'eau thermique que le bourrelet de travertin, observé à la base des murs, s'est développé.

B.III.2.4.2. Analyse stratigraphique et interprétation géoarchéologique du bourrelet de travertin.

Trois sections (coupes A, B et C, Fig. B.96) ont été étudiées au sein du bourrelet de travertin ceinturant le sol du portique périphérique de la salle T5. Chacune des trois coupes a fait l'objet d'une description et d'une interprétation géoarchéologique indépendantes, avant une synthèse chronologique des différents événements identifiés.

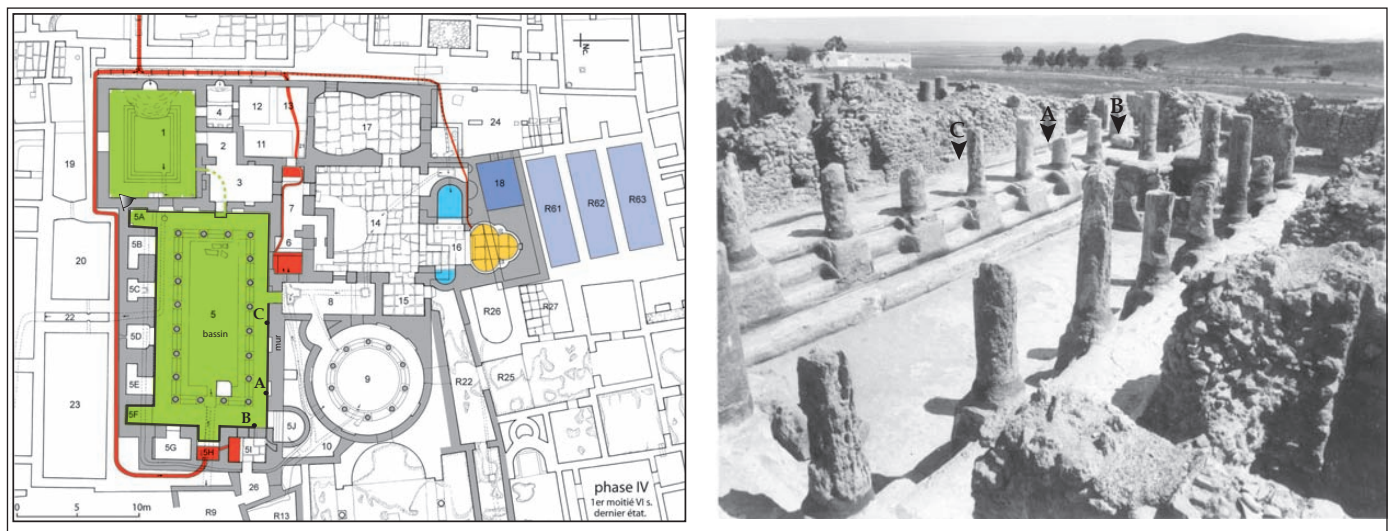


Figure B.96. Localisation des coupes A, B et C du bourrelet de travertin de la salle T5, sur le plan de la phase IV des thermes (image de gauche) et sur une prise de vue depuis le sud-ouest (image de droite, photo M. Fendri).

B.III.2.4.2.1. Description stratigraphique et interprétation géoarchéologique de la coupe A.

Description stratigraphique de la coupe A (Fig. B.97) :

Sur la coupe A, une succession de dépôts anthropiques (mortier) et sédimentaires (travertin), depuis le mur de la salle T5 et en direction du bassin central de cette salle peut être identifiée :

- Une couche de mortier clair et grossier, à inclusions calcitiques, recouvert à certains endroits d'un enduit lisse et blanc, d'environ 1 mm d'épaisseur **(1)**
- Un dépôt de travertin laminé et blanchâtre **(2)**
- Une couche de mortier hydraulique (mortier de tuileau) **(3)**
- Un dépôt de travertin laminé **(4)**
- Une couche de mortier hydraulique (mortier de tuileau) **(5)**
- Un dépôt de travertin laminé **(6)**
- Un dépôt de travertin buissonnant, dit en « chou-fleur » **(7)**

Limitant certains dépôts anthropiques et sédimentaires, **trois troncatures de bûchage** sont nettement visibles dans les dépôts de la coupe A. Une première (tb1) affecte la couche de mortier clair (1) et est recouverte par un mortier hydraulique (3). Une seconde (tb2) affecte le dépôt de travertin laminé (2), enfin une troisième (tb3), et ultime troncature, affecte les dépôts de travertin laminé (4) et de mortier de tuileau (3). Ces troncatures témoignent évidemment d'une volonté d'entretien à travers le bûchage des dépôts antérieurs et la mise en place d'une couche de mortier hydraulique pour une nouvelle mise en eau de la pièce. Ces phases de réfection se distinguent d'un entretien quotidien de la salle.

Interprétation géoarchéologique de la coupe A :

La succession stratigraphique des dépôts anthropiques et sédimentaires conservés dans la coupe A nous amène à émettre certaines interprétations concernant la formation du bourrelet de travertin et, plus généralement, sur les conditions d'existence de ce bourrelet.

Le mortier clair et grossier (1), recouvert d'une fine couche d'enduit blanc et lisse, traduit la phase de construction de la salle T5, lors de la phase IV des thermes. La troncature, qui affecte cette première couche, témoigne d'une phase de réfection et d'un bûchage volontaire (tb1) dans le but très probable de nettoyer et d'éliminer les dépôts de travertin qui avait dû certainement se former sur le mortier grossier (1) au pied de ces murs.

Le dépôt d'un travertin laminé (2) recouvrant la troncature de bûchage et le mortier (1) témoigne, à la suite de la première phase de réfection (bûchage et pose d'un nouveau mortier hydraulique), d'une phase de mise en eau de la salle T5 (**phase 1 de mise en eau**), dont le sol du portique est alors ennoyé. La conservation partielle

de ce travertin laminé, et la troncature nettement visible affectant ce dépôt (tb2), sont la preuve d'une nouvelle phase de réfection, qui va se dérouler en deux étapes, *i*) la suppression, partielle, du dépôt de travertin (2) ; *ii*) la mise en place d'un nouveau mortier hydraulique (3).

Suite à ce deuxième épisode de réfection, une phase de mise en eau va avoir lieu (**phase 2 de mise en eau**), dont l'enregistrement sédimentaire réside dans le vestige d'un dépôt de travertin laminé (4). A nouveau, une troncature de bûchage (tb3) qui affecte le travertin laminé (4) ainsi que le mortier hydraulique (3) traduit un épisode de réfection (bûchage et pose d'un nouveau mortier hydraulique). La mise en place d'un nouveau mortier de tuileau (5), venant combler les irrégularités consécutives au bûchage effectué précédemment, représente l'ultime étape de cet épisode de réfection.

Suite à cette phase de réfection, la salle est à nouveau ennoyée par l'eau thermale (**phase 3 de mise en eau**), comme en témoignent les dépôts de travertin laminé (6) et buissonnant (7). Cette phase de mise en eau, qui ne sera pas suivie d'une phase de réfection (les dépôts de travertin ne sont pas affectés par des troncatures de bûchage), représente l'ultime épisode d'ennoiement de la salle, avant l'arrêt final de l'alimentation en eau thermale de T5. Cette caractéristique est très intéressante pour notre enquête géoarchéologique, puisqu'ainsi, les enregistrements sédimentaires de cette ultime mise en eau, ie. les dépôts de travertin laminé (6) et de travertin buissonnant (7), sont intégralement conservés et vont pouvoir offrir plusieurs informations sur leurs conditions de dépôt. Le bourrelet de travertin (6) présente un faciès laminé, identique au faciès des travertins chronologiquement précédents (2 et 4). Ce bourrelet traduit une phase d'ennoiement du sol de la salle T5, avec un niveau d'eau fluctuant (**phase 3a**), depuis le sol du portique de T5, situé à la cote de 123,45 m, jusqu'à un niveau avoisinant la cote de 124 m. Le niveau moyen de la nappe d'eau qui ennoie la salle T5 peut être repéré au niveau de l'épaisseur maximale du dépôt de travertin, ie. à la cote 123,57 m.

Le second bourrelet de travertin, le travertin buissonnant (7), présente un faciès différent avec la présence notable de structures biologiques génératrices du dépôt carbonaté, et qui donne au faciès du travertin un aspect stromatolithique. Ce type de dépôt traduit des conditions physico-chimiques stables dans la précipitation carbonatée, et donc un environnement de dépôt nettement différent de l'environnement de dépôt du travertin laminé (6), permettant aux structures biologiques de se développer. Ce bourrelet de travertin « biologique » s'est ainsi formé lors de l'ultime phase de mise en eau de la salle T5, lorsque le sol du portique est ennoyé et que le niveau d'eau moyen demeure à une altitude constante (**phase 3b**), à la cote de 123,78 m.

Ainsi, la lecture géoarchéologique de la coupe A nous a permis de mettre en évidence plusieurs phases successives de mise en eau qui alternent avec des épisodes de réfection. La synthèse géoarchéologique de la coupe A est la suivante :

- **Phase de construction** – mise en place du mortier clair à inclusions calcitiques et de l'enduit.
- **Phase de mise en eau (?)** – nous n'avons pas d'enregistrements sédimentaires (dépôt de travertin) té-

moignant de cette phase de mise en eau. Néanmoins, cette phase de mise en eau a probablement existé, comme en témoigne la troncature qui affecte le mortier initial (1), et qui reflète certainement un bûchage volontaire dans le but d'éliminer des dépôts de travertin préexistants.

- **Phase a de réfection** – cette phase est mise en évidence par la présence de la troncature (tb1) qui affecte le mortier clair et grossier (1).

- **Phase 1 de mise en eau** – cette phase est mise en évidence grâce à la présence du dépôt de travertin laminé (2).

- **Phase b de réfection** – cette phase est mise en évidence par la présence d'une troncature de bûchage (tb2) affectant le travertin laminé précédent (2) et par la mise en place d'une couche de mortier hydraulique (3) pour étanchéifier et régulariser l'ensemble.

- **Phase 2 de mise en eau** – cette phase est enregistrée par le dépôt du travertin laminé (4), vestige d'un dépôt de travertin qui formait alors le bourrelet.

- **Phase c de réfection** – cette phase de réfection est mise en évidence par la présence d'une troncature (tb3) reflétant un bûchage volontaire dans la but d'éliminer le dépôt de travertin (4) et par la mise en place d'un mortier hydraulique (5) pour étanchéifier, à nouveau, et régulariser l'ensemble.

- **Phase 3 de mise en eau** – cette phase 3 est mise en évidence par la présence des deux dépôts en forme de bourrelet, l'un étant laminé (6), le second buissonnant (7). Cette ultime phase de mise en eau de la salle T5 et de l'ennoiment de son sol peut ainsi être divisée en deux sous-phases, correspondant à deux environnements de dépôt différents liés à deux conditions hydrodynamiques différentes :

- o **Phase 3a** – niveau d'eau fluctuant : travertin laminé (6)

- o **Phase 3b** – niveau d'eau constant : travertin buissonnant (7)

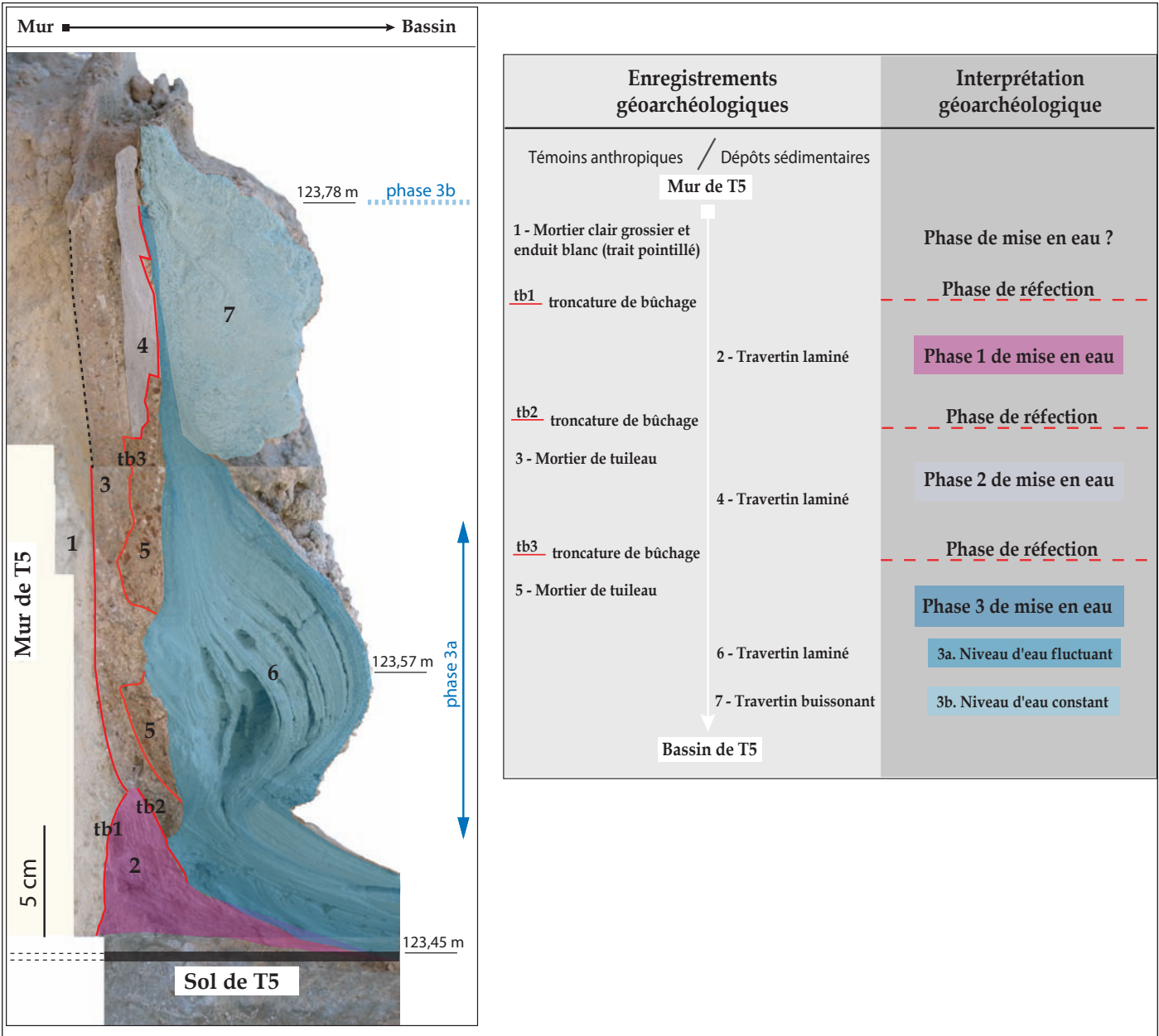


Figure B.97. Relevé et interprétation géoarchéologique de la coupe A dans le bourrelet de travertin de la salle T5 des thermes.

B.III.2.4.2.2. Description stratigraphique et interprétation géoarchéologique de la coupe B.**Description stratigraphique de la coupe B (Fig. B.98) :**

Sur la coupe B, une succession de dépôts anthropiques (mortier) et sédimentaires (travertin) se met en place depuis le mur de la salle T5, en direction du bassin central de la salle. La base de la coupe B, jusqu'au sol du portique de T5 situé à la cote de 123,45 m, n'a pas pu être atteint pour des raisons pratiques de terrain.

La séquence stratigraphique se présente comme suit :

- Une couche de mortier clair et grossier, à inclusions calcitiques, recouvert à certains endroits d'un enduit lisse et blanc, d'environ 1 mm d'épaisseur **(1)**
- Une couche de mortier hydraulique (mortier de tuileau) **(3)**
- Un dépôt de travertin laminé **(4)**
- Une couche de mortier hydraulique (mortier de tuileau) **(5)**
- Un dépôt de travertin laminé **(6)**
- Un dépôt de travertin buissonnant, dit en « chou-fleur » **(7)**

De plus, en parallèle de ces dépôts anthropiques et sédimentaires, **deux troncatures de bûchage** sont repérables. Une première (tb2) affecte le mortier clair et grossier (1) et l'enduit lisse qui le recouvre, et la seconde (tb3) affecte le dépôt de travertin laminé (4).

Interprétation géoarchéologique de la coupe B :

La séquence stratigraphique des dépôts anthropiques et sédimentaires préservés sur la coupe B nous amène à définir certaines interprétations concernant la formation du bourrelet de travertin, en parallèle des interprétations que nous avons pu effectuer précédemment, au niveau de la coupe A.

Le mortier clair et grossier (1), recouvert d'une fine couche d'enduit blanc et lisse, traduit la première phase d'utilisation de la salle T5, lors de la phase IV des thermes. Nous avons pu observer cette couche de mortier recouvert d'un enduit dans la coupe A, les deux couches correspondent au même épisode de mise en place du mortier et de l'enduit qui le recouvre. La troncature (tb2) qui affecte ce mortier et l'enduit, témoin d'un épisode volontaire de bûchage, traduit une phase de réfection. Contrairement aux observations faites dans la coupe A, le travertin laminé (2) n'est pas présent dans la coupe B. Le dépôt de ce travertin (2) a certainement été oblitéré par les travaux de réfection postérieurs. La couche de mortier hydraulique (3) représente l'ultime étape de cette phase de réfection et précède une nouvelle phase de mise en eau de la salle.

Cette phase (**phase 2 de mise en eau**) est marquée par la présence d'un vestige du dépôt d'un travertin laminé (4), reposant sur le mortier hydraulique mise en place précédemment (3). La troncature (tb3) affectant le travertin laminé (4) témoigne d'un bûchage volontaire dans le but de nettoyer ces dépôts. Cette nouvelle phase de réfection est conclue par la mise en place d'un nouveau mortier hydraulique (5), afin d'étanchéifier et régulariser l'ensemble.

A la suite de cette phase de travaux de réfection, la salle est à nouveau ennoyée par une nappe d'eau (**phase 3 de mise en eau**). Comme c'est le cas pour la coupe A, nous observons lors de cette ultime phase d'enneigement la formation de deux bourrelets de travertin, l'un laminé (6) et le second buissonnant (7). Le premier bourrelet, laminé, apparaît incomplet sur la coupe B puisque le sol (la base de la coupe, à la cote de 123,45 m) n'a pu être observés. Cependant, ce bourrelet de travertin laminé témoigne très certainement d'un battement de la nappe d'eau ennoyant le sol de T5 (**phase 3a**) et, par analogie avec le modèle décrit dans la coupe A, avec un niveau moyen de l'eau situé à la cote 123,57 m, soit 12 cm au-dessus du niveau de sol.

Le second bourrelet qui est lui, buissonnant (7), présente un faciès différent caractérisé par la présence de structures biologiques génératrice du dépôt carbonaté, donnant au travertin un aspect stromatolithique. Ce travertin buissonnant, analogue au travertin buissonnant de la coupe A, traduit un environnement de dépôt caractérisé par des conditions physico-chimiques stables de précipitation carbonatée, permettant le développement de ces structures biologiques. Ce travertin « biologique » se dépose lors de l'ultime phase d'enneigement du sol de T5 (**phase 3b**), lors de conditions hydrodynamiques relativement calmes et stables, c'est-à-dire avec un niveau d'eau constant, à la cote de 123,78 m.

Ainsi, la lecture géoarchéologique de la coupe B nous a permis de mettre en évidence plusieurs phases successives de mise en eau, en alternance avec des épisodes de réfection. La synthèse géoarchéologique et chronologique de l'étude de la coupe B est la suivante :

- **Phase de construction** – mise en place du mortier clair à inclusions calcitiques et de l'enduit.
- **Phase de mise en eau (?)** – comme pour la coupe A, nous manquons d'un témoin direct pour cette phase de mise en eau dans la coupe B. Néanmoins, la troncature (tb2) affectant le mortier clair et grossier (1) témoigne certainement d'un bûchage volontaire dans le but d'enlever des dépôts préexistants, consécutifs à un enneigement précédent, comme nous l'avons interprété pour la coupe A.
- **Phase (b) de réfection** – cette phase est mise en évidence par la présence de la troncature (tb2) précédemment citée qui vient affecter le mortier (1). Cette phase de réfection, qui visait certainement à éliminer les travertins déposés lors de la phase initiale de mise en eau, peut également être interprétée comme responsable de l'absence du dépôt de travertin laminé (2) présent dans la coupe A et déposé lors de la phase 1 de mise en eau. La pose d'une couche de mortier hydraulique (3), afin d'étanchéifier et régulariser l'ensemble, vient clore cette phase de réfection et prépare à une nouvelle mise en eau de la salle.

• **Phase 2 de mise en eau** – cette phase est mise en lumière grâce à la présence du dépôt de travertin laminé (4).

• **Phase (c) de réfection** – cette phase de réfection est mise en évidence grâce à la présence d'une troncature (tb3) témoignant d'un bûchage volontaire dans le but d'éliminer le dépôt de travertin existant (4) et par la mise en place d'une couche de mortier hydraulique (5) pour, à nouveau, étanchéifier et régulariser la structure.

• **Phase 3 de mise en eau** – la phase 3 de mise en eau est traduite par la présence des deux dépôts de travertin qui scellent la séquence, l'un étant laminé (6), le second buissonnant (7). Cette ultime phase de mise en eau de la salle T5 et d'ennoïement de son sol peut être ainsi divisée en deux sous-phases, correspondant à deux environnements de dépôt différents liés à deux conditions hydrodynamiques différentes :

- o **Phase 3a** – niveau d'eau fluctuant : travertin laminé (6)
- o **Phase 3b** – niveau d'eau constant : travertin buissonnant (7)

B.III.2.4.2.3. Description stratigraphique et interprétation géoarchéologique de la coupe C.

Description stratigraphique de la coupe C (Fig. B.98) :

Si la coupe C paraît la moins bien préservée parmi les trois coupes étudiées (peu de dépôts conservés), elle apporte néanmoins des informations complémentaires indispensables à notre analyse géoarchéologique. Nous observons, au sein de cette coupe C, une succession de dépôts anthropiques (mortier) et sédimentaires (travertin), depuis le mur de la salle T5 et en direction du bassin central de la salle. La séquence stratigraphique se présente ainsi :

- Une couche de mortier clair et grossier, à inclusions calcitiques (1)
- Un dépôt de travertin laminé et blanchâtre (2)
- Une couche de mortier hydraulique (mortier de tuileau) (3)
- Un dépôt de travertin laminé (4) [ou (6)]

De plus, en parallèle de ces dépôts anthropiques et sédimentaires, **deux troncatures de bûchage** sont nettement visibles dans la coupe C. La première (tb1) affecte très largement le dépôt de mortier clair et grossier (1), la seconde (tb2) affecte le dépôt de travertins laminés (2).

Interprétation géoarchéologique de la coupe C :

La lecture stratigraphique de la coupe C permet d'identifier des phases de développement de travertin et des phases d'action humaine, en complément de l'étude des deux coupes précédentes.

Le mortier clair et grossier (1) traduit la première phase d'utilisation de la salle T5, lors de la phase IV des thermes, comme nous l'avons perçu en A et en B. Contrairement aux coupes A et B, ce mortier n'est pas, au sein de la coupe C, recouvert d'un enduit. Ce fait s'explique certainement par la phase de réfection marquée par la grande troncature de bûchage (tb1) venant affecter le mortier et qui dont l'action a complètement éliminé l'enduit recouvrant ce mortier. Suite à ce premier bûchage, un dépôt de travertin laminé et blanchâtre (2) vient se mettre en place directement sur le mortier initial, et est relativement bien préservé ici. Ce dépôt traduit une phase de mise en eau de la salle T5 (**phase 1 de mise en eau**) avec ennoisement du sol du portique. La troncature de bûchage (tb2) affectant largement ce dépôt de travertin témoigne d'une nouvelle phase de réfection qui se termine par la mise en place d'un mortier hydraulique (3).

Suite à ce second épisode de réfection, une phase de mise en eau a lieu (**phase 2 de mise en eau**), dont l'enregistrement sédimentaire est le vestige d'un dépôt de travertin laminé (4) préservé dans la coupe, et qui scelle la séquence. Nous ne pouvons pas omettre le fait que ce dépôt de travertin peut également correspondre au dépôt de travertin laminé postérieur (6) que nous avons vu et décrit dans les modèles A et B, en supposant qu'un épisode de réfection a complètement oblitéré le travertin laminé (4) et le mortier hydraulique (3) sur lequel il reposait. Cependant, nous pensons qu'il est préférable d'interpréter le vestige du travertin scellant la séquence comme le résultat d'une conservation différentielle des dépôts sédimentaires, sans aucun rapport avec un quelconque bûchage antique conséquence d'un entretien volontaire de la salle T5. Cette conservation différentielle des dépôts du bourrelet dans la coupe C a également provoqué la disparition des deux bourrelets de travertin terminaux, qui existent dans les coupes A et B (6 et 7).

Ainsi, la lecture géoarchéologique de la coupe C nous a permis de mettre en évidence plusieurs phases successives de mise en eau, en alternance avec des épisodes de réfection. La synthèse géoarchéologique et chronologique de l'étude de la coupe B est la suivante :

- **Phase de construction** – mise en place du mortier clair à inclusions calcitiques et de l'enduit.
- **Phase de mise en eau (?)** – comme pour les deux précédentes coupes A et B, nous n'avons pas d'enregistrements sédimentaires de cette phase initiale de mise en eau. Néanmoins, la grande troncature (tb1) affectant le mortier initial (1) reflète un bûchage volontaire dans le but de nettoyer des dépôts de travertins préexistants, consécutifs à une phase de mise en eau.
- **Phase (a) de réfection** – cette phase est définie grâce à la présence de la grande troncature citée pré-

cédemment, qui affecte le mortier clair et grossier (1).

- **Phase 1 de mise en eau** – cette phase 1 de mise en eau est mise en évidence grâce à la présence du dépôt de travertin laminé (2), partiellement préservé dans la coupe.

- **Phase (b) de réfection** – cette phase est mise en lumière grâce à la présence de la troncature de bûchage (tb2) affectant le travertin laminé (2) et par la pose très ponctuelle et localisée d'un mortier hydraulique (3).

- **Phase 2 de mise en eau** – cette phase est enregistrée par le dépôt de travertin laminé (4), vestige d'un dépôt de travertin qui formait le bourrelet.

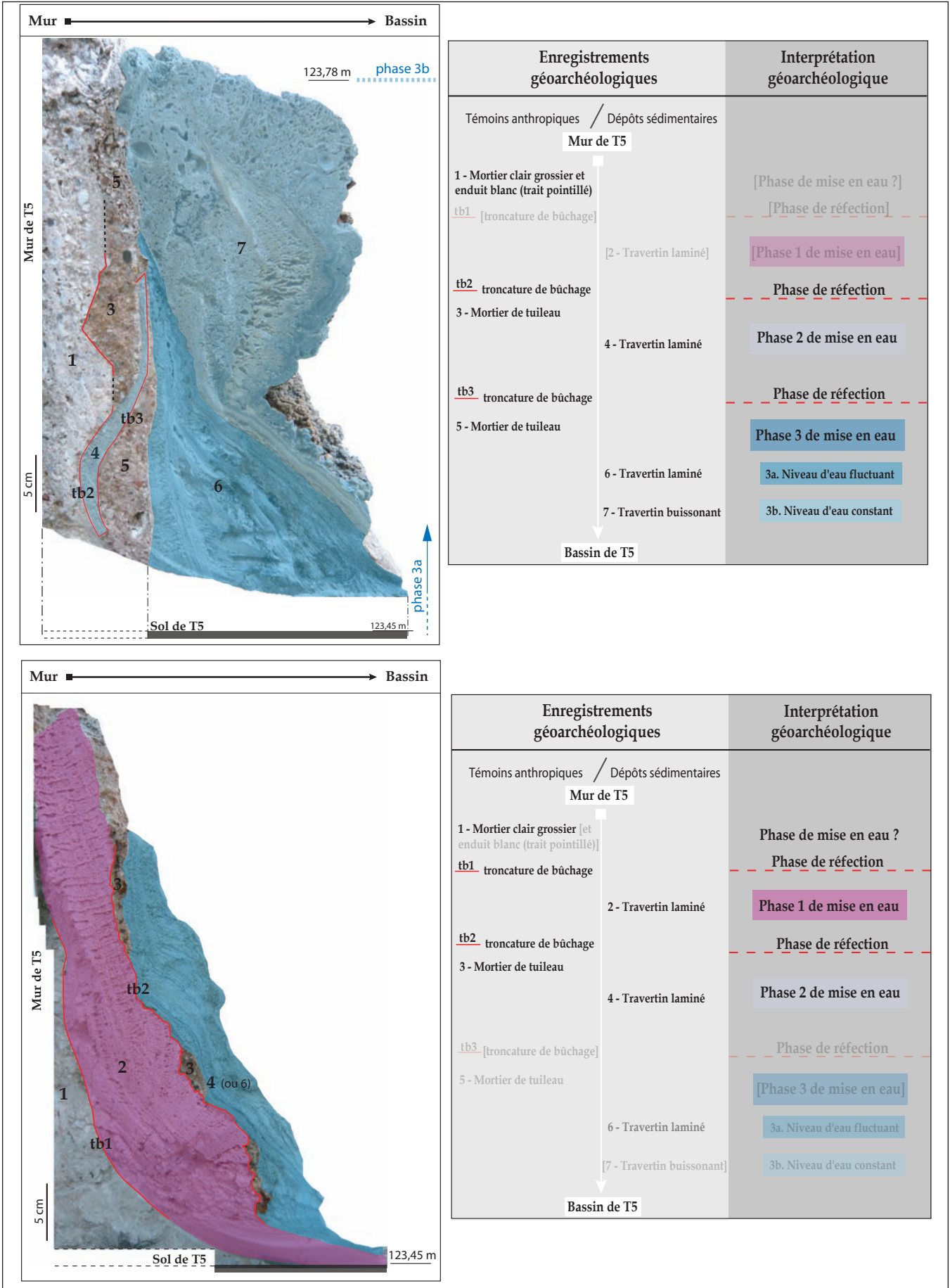


Figure B.98. Relevé et interprétation géoarchéologique des coupes B (en haut) et C (en bas) dans le bourrelet de travertin de la salle T5 des thermes.

B.III.2.4.3. Synthèse chronologique et géoarchéologique issue de l'étude des trois coupes A, B et C réalisées dans le dépôt de travertin périphérique (Fig. B.99)

A la suite de l'étude et de l'analyse des trois coupes réalisées dans le bourrelet de travertin, nous pouvons proposer une synthèse chronologique reprenant l'ensemble des informations. Ainsi, il est possible d'établir maintenant une chrono-séquence type illustrant une partie de l'histoire de la salle T5 lors de la phase IV des thermes.

B.III.2.4.3.1. Une chrono-séquence type de la phase IV des thermes : phases de mise en eau et phases de réfection.

Cette **chrono-séquence type** de la salle T5 lors de la phase IV des thermes se présente ainsi :

- 7 – travertin buissonnant, présentant un faciès en « chou-fleur »
- 6 – travertin laminé
- 5 – mortier hydraulique (mortier de tuileau)
- [tb3] – troncature de bûchage
- 4 – travertin laminé
- 3 – mortier hydraulique (mortier de tuileau)
- [tb2] – troncature de bûchage
- 2 – travertin laminé et blanchâtre
- [tb1] – troncature de bûchage
- 1 – mortier clair et grossier, à inclusions calcitiques, recouvert d'un enduit blanc et lisse

Cette chrono-séquence permet de définir un phasage de la salle T5, au cours de la phase IV des thermes, lorsque ces derniers sont annexés par la villa et deviennent privés. Ce phasage voit alterner des phases de mise en eau de la salle T5, avec ennoiment du sol sous le portique par une nappe d'eau, et des phases de travaux de réfection de la salle.

Le phasage chronologique se présente ainsi :

Phase IV des thermes [V^e – VI^e s.]

- Phase 3b en eau, avec un niveau d'eau constant (niveau : 123,78 m)
- Phase 3a en eau, avec un niveau d'eau fluctuant (niveau moyen : 123,57 m)
- Phase c de réfection
- Phase 2 en eau
- Phase b de réfection
- Phase 1 en eau
- Phase a de réfection
- Phase de mise en eau initiale

Trois états successifs de mise en eau de la salle T5 lors de la phase IV des thermes, ajoutée à la phase de mise en eau initiale, sont donc identifiés. Ces états de mise en eau et d'ennoiement du sol de T5 alternent avec, au moins, trois phases de réfections, au cours desquelles des travaux d'entretien sont réalisés dans le but de bûcher les travertins déposés et de mettre en place un mortier hydraulique pour préparer la nouvelle phase de mise en eau.

S'il ne reste aucun témoin sédimentaire de la phase de mise en eau initiale, celle-ci est supposée par la présence d'une grande troncature (tb1) affectant le mortier initial recouvert de son enduit, dont le but était très certainement d'éliminer les dépôts de travertins préexistants. Il est intéressant de noter que, comme les travertins de la phase 1 de mise en eau définie précédemment (associée au dépôt de travertin laminé (2)), les travertins de la phase initiale de mise en eau se sont mis en place directement sur un mortier grossier à inclusions calcitiques, non spécifique à une étanchéité hydraulique comme peut l'être un mortier de tuileau. Il paraît ainsi évident que l'ennoiement du sol de la salle T5 n'était pas initialement prévu. En revanche, la mise en place d'un mortier hydraulique (béton de tuileau) lors des phases de réfection postérieures (phases [b] et [c]) prouve que l'ennoiement du sol de T5 par une nappe d'eau d'une dizaine de centimètres d'épaisseur est complètement assumé et volontaire, puisque l'on recouvre la base des murs, d'un mortier hydraulique.

Lors de la dernière phase, deux états se distinguent ; un premier, dans la lignée des précédents, connaît une alimentation en eau thermique continue et un dynamisme relatif du flux d'eau, avec un niveau moyen de la nappe d'eau située à la cote 123,57 m. Quant au second, et ultime épisode d'ennoiement de T5, il voit sa nappe d'eau stagner, état dont la cause est certainement à chercher vers un « effet de seuil » provoqué quelque part en aval à la cote 123,78 m.

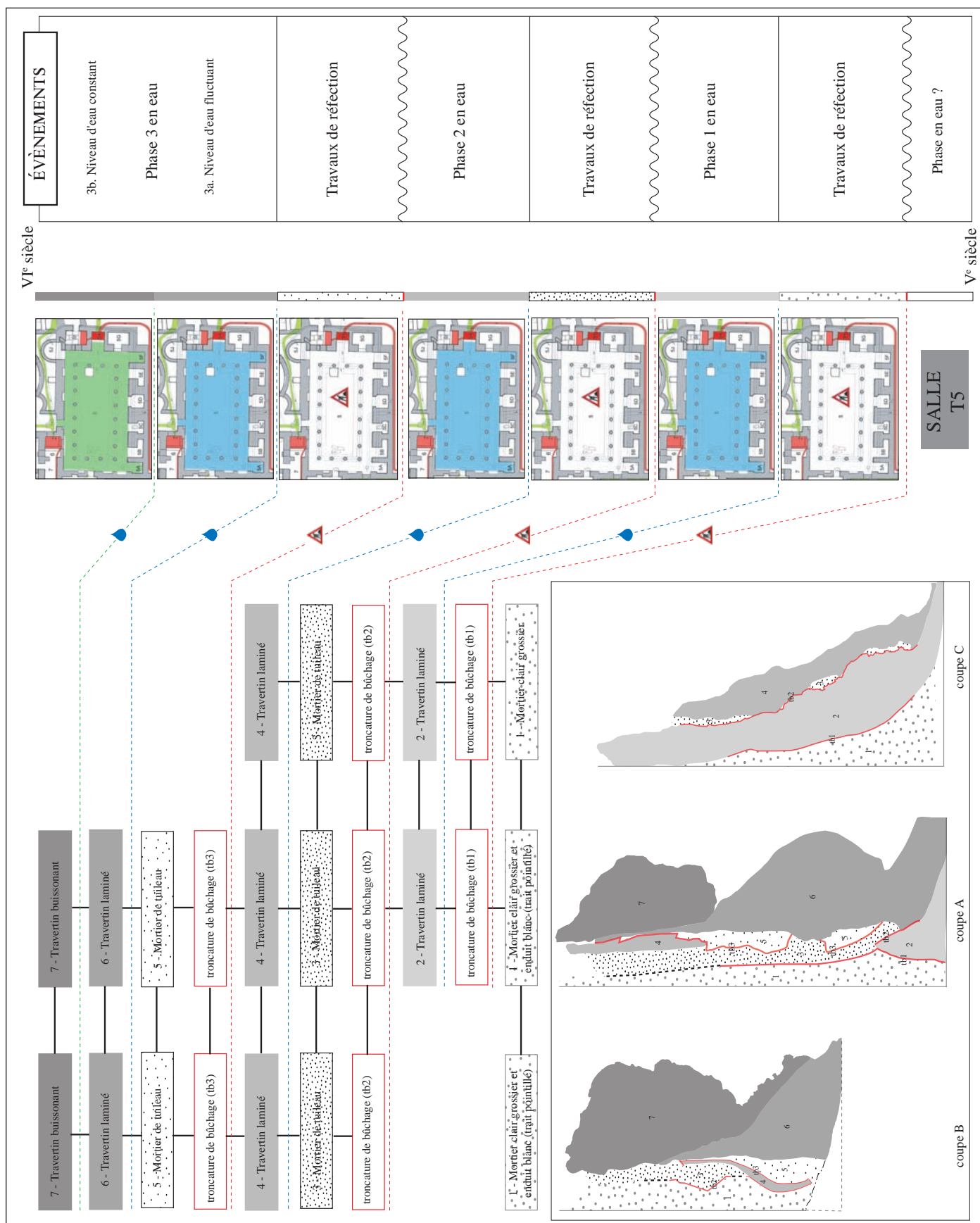


Figure B.99. Synthèse chronologique et géoarchéologique de la salle T5 au cours de la phase IV des thermes, d'après l'analyse des coupes A, B et C du bourrelet de travertin périphérique.

B.III.2.4.3.2. Le changement de fonction de la salle T5.

Lors des phases de mise en eau de T5 appartenant à la phase IV des thermes, il ne fait aucun doute que le sol du portique ceinturant le bassin central est recouvert par une nappe d'eau d'une dizaine de centimètres.

Cet état de fait engendre quelques interrogations quant à la nature et la fonction qu'opère la salle T5 lors cette phase chronologique. Il est impossible de concevoir que la salle T5 soit utilisée, dans la continuité de son rôle et sa fonction lors des phases chronologiques précédentes, encore comme une piscine tiède dans laquelle les baigneurs avaient la possibilité de s'immerger, partiellement ou complètement, et pouvaient profiter des emmarchements de la piscine pour s'asseoir. Le rôle que peut assumer alors la grande salle T5 peut être un rôle de réservoir pour stocker l'eau thermale. Bien entendu, l'attribution de la fonction de réservoir à cette salle n'empêche pas une immersion ou une baignade à titre privé, qui se fait alors dans une masse d'eau beaucoup plus importante que prévue pour la pratique du bain initial (niveau d'eau plus élevé et sol de circulation autour de la piscine ennoyé).

Si l'on observe un changement dans la fonction de la salle, lié à un changement dans la gestion du domaine thermal et des pratiques balnéaires, nous avons néanmoins la preuve de la continuité d'un certain entretien de cette salle. En d'autres thermes, **l'abandon de T5 en tant que piscine tiède pour un rôle de réservoir de stockage de l'eau thermale n'engendre pas l'abandon de son entretien.**

B.III.2.4.3.3. L'entretien permanent d'un domaine "thermal" devenu privé.

L'annexion des thermes par la villa lors de la phase IV des thermes, datée du début du V^e siècle de notre ère, entraîne, entre autres conséquences, une modification du rôle et de la fonction de la salle T5. Cette dernière, qui était la piscine tiède dans l'édifice thermal public de Jebel Oust, fait désormais office de réservoir de stockage de l'eau thermale. Les témoins laissés par des travaux de réfection (troncature de bûchage et mise en place de mortier) mettent en évidence des phases d'entretien de cette salle, lorsqu'elle est utilisée comme réservoir. Cet entretien débute dès les premiers états d'ennoisement de la salle, lorsque les dépôts carbonatés se forment à la base du mur, sur un mortier grossier à inclusions calcitiques, qui est un mortier à priori non hydraulique. Ceci permet de penser que l'ennoisement initial n'était assurément pas volontaire, tandis que lors des phases suivantes, un mortier hydraulique vient suppléer le mortier initial à la base des murs, assumant ainsi parfaitement l'ennoisement du sol du portique de T5 lors de sa nouvelle fonction de réservoir.

L'entretien se poursuit tout au long de la phase IV des thermes (avec la mise en place d'un mortier hydraulique, suppléant le mortier initial), et s'il s'avère efficace, il est intéressant de noter qu'il n'est jamais, ou très rarement, complet. En effet, lors de chaque phase de réfection que nous avons pu définir à la lecture des trois coupes, nous remarquons que cette réfection n'est que partielle, comme en témoignent deux observations :

- le dépôt de travertin antérieur qui n'est pas complètement éliminé lors des différents bûchages : c'est le cas, par exemple, du travertin laminé (2) dans les coupes A et C, et du dépôt de travertin (4) dans les coupes A, B et C ;

- la mise en place partielle et ponctuelle de certaines couches de mortier hydraulique badigeonné sur les dépôts antérieurs, par exemple le mortier de tuileau (3) dans la coupe C, et le mortier de tuileau (5) dans la coupe A. Pour ceux-là, le mortier est seulement posé ponctuellement, pour régulariser de manière rudimentaire la surface.

Ainsi, nous possédons, à travers l'exemple de la salle T5 des thermes de Jebel Oust, alors utilisée comme réservoir lors de la phase IV des thermes, les preuves géoarchéologiques d'un entretien permanent, par le biais de phases de réfection (bûchage des dépôts et mise en place d'un nouveau mortier), d'un édifice devenu privé.

Conclusion.

La méthodologie abordée ici témoigne de la nécessité de lire et d'observer les stratigraphies géoarchéologiques. La lecture de trois coupes identifiées dans le bourrelet de travertin qui se forme à la base des murs de la salle T5 nous offre une lumière sur l'histoire, tout du moins une partie, de la salle T5, et plus généralement sur le bâtiment thermal devenu privé. L'annexion des thermes par la *villa* au début du V^e siècle voit le rôle et la fonction de la salle T5 changer et son sol être ennoyé par une nappe d'eau d'une dizaine de centimètres.

D'un rôle de piscine tiède lors du fonctionnement public des thermes, la salle T5 acquiert un rôle de réservoir de l'eau thermale lors de la phase privée. L'ennoiement de son sol a engendré la formation d'un bourrelet de travertin, en parallèle des dépôts qui se forment sur les marches de l'ancienne piscine et sur le sol du portique ceinturant cette dernière, un bourrelet à la base des murs de la salle. La structure de ce bourrelet, qui laisse apparaître plusieurs générations de dépôts de travertin entrecoupées d'épisodes de mise en place de mortier, témoigne de la volonté d'entretien de la salle lors de son fonctionnement privé.

B.III.2.5. L'histoire d'un tuyau : l'alimentation en eau de la salle T4.

Les tuyaux sont des éléments fondamentaux de tout système hydraulique et font partie intégrante du complexe thermal de Jebel Oust, participant pleinement à la gestion hydraulique mise en oeuvre dans ce dernier. Ainsi, leur étude est indispensable à la compréhension du fonctionnement des thermes, en particulier de leur alimentation. Nous présentons ici l'analyse géoarchéologique d'un tuyau de la salle T4 des thermes, nous permettant de mettre en évidence un dysfonctionnement hydraulique dans l'alimentation de cette pièce.

B.III.2.5.1. L'histoire de la salle T4.

La salle T4, telle qu'on la connaît actuellement, est créée lors de la **phase III des thermes** (*terminus post-quem* IV^e s. apr. J.-C.), lorsque l'on décide d'augmenter la capacité d'accueil de l'édifice thermal. Cette salle est créée au détriment d'une partie de la salle T2/T4 par l'érection d'une simple cloison et l'obturation de la porte T4/T12. L'accès à la salle T4 se faisait par le sud, à partir de la salle T1, tandis qu'une fenêtre installée dans le mur nord en assurait l'éclairage. De dimensions relativement réduites (5*3 m), la salle T4 est occupée à l'ouest par une petite baignoire profonde à laquelle fait face un banc adossé à la paroi orientale.

Comme l'attestent les nombreux fragments de tubes de coffrage en terre cuite encroûtés dans les dépôts de travertin qui recouvrent encore le rebord ouest de la baignoire, la salle T4 était couverte par une voûte. Les parois de la pièce ainsi que l'ensemble des aménagements qu'elle abrite étaient recouverts ou réalisés avec des plaques de calcite filonienne.

La cloison qui sépare T4 de T2 repose directement sur la mosaïque de la phase précédente et sur la dalle de couverture de l'égout d'évacuation des eaux de la baignoire. La fenêtre, large de 85 cm et ouvrant vers le nord, est relativement bien conservée. Ses deux piédroits sont construits avec des blocs grossièrement taillés dans du calcaire lacustre. Les tableaux et l'appui de la baie sont recouverts de plaques décoratives en calcite filonienne. Des fragments de vitre, provenant de cette fenêtre, ont été piégés dans les dépôts de travertin. La niche située au centre de la paroi ouest a été retaillée dans la maçonnerie du mur antérieur qui, du fait de sa faible épaisseur, a vu son parement extérieur être percuté par le fond de la niche. La brèche ainsi créée a été obturée par une simple brique posée de champ.

La baignoire, qui occupe la partie occidentale de la pièce, est de plan semi-circulaire. Elle est pourvue d'une marche-margelle et d'un degré d'accès interne faisant siège, et pouvait accueillir simultanément deux à trois baigneurs pour une immersion totale. Cette baignoire a la caractéristique de posséder deux tuyaux d'alimentation en eau thermale, dont il est impossible de savoir si ils ont fonctionné de façon simultanée. L'un provient de la canalisation d'eau thermale issue du grand aqueduc et débouche dans la niche installée dans la paroi ouest. La seconde débouche sous le piédroit ouest de la fenêtre et est faite d'un tuyau de terre cuite qui s'ouvrait à l'autre extrémité dans le réservoir de refroidissement T12. Si ces deux canalisations ont fonctionné en contemporanéité, elles devaient permettre de réguler la température de l'eau du bassin, puisque l'une servait

d'adduction d'eau thermique à température maximale et la seconde d'adduction d'eau thermique refroidie.

Le tuyau d'évacuation de l'eau, situé sous les emmarchements de la baignoire, rejoignait un égout qui, passant successivement sous la cloison est de T4, puis sous le seuil T1/T2 et les emmarchements de la piscine T1, et se déversait dans le grand égout collecteur situé sous la galerie sud de la salle T5.

Dans la dernière phase d'utilisation, le sol de la salle a été rehaussé, probablement suite à des dépôts excessifs de travertins, et régularisé avec la mise en place d'une grande dalle de calcaire gris local. Cette dernière, accolée à la marche-margelle, occupe le centre de la pièce et seul un espace est aménagé sur le côté pour l'écoulement de l'eau résultant de l'activité des baigneurs. Une brèche est alors percée dans la cloison orientale de la salle afin d'évacuer cette eau, qui allait se déverser dans un égout ménagé sous le dallage de la salle T2/T3. Cet égout débouche dans la salle T5, directement sur le sol de la galerie qui ceinture la grande piscine. Cette solution sommaire et techniquement très simple de vidange de l'eau de la baignoire de T4 prouve que nous sommes bien, à ce stade, dans les phases tardives de fonctionnement des thermes.

B.III.2.5.2. Etude géoarchéologique du tuyau d'eau tiède.

Une des deux adductions d'eau de la baignoire de la salle T4 est un tuyau en terre cuite provenant du réservoir de refroidissement T12 (voir la localisation sur Fig. B.100). Ce tuyau, qui débouche sous la fenêtre située dans la paroi nord de la pièce, alimentait donc la baignoire en eau thermique refroidie. Le tuyau, tel qu'il se présente actuellement, est noyé sous les dépôts de travertin engendrés par l'eau thermique. Un nettoyage et une étude stratigraphique de ces dépôts permettent d'en savoir plus sur l'histoire de ce tuyau d'eau tiède, sur son fonctionnement (et son dysfonctionnement), et sur les différents épisodes de dépôt sédimentaire qui lui sont associés.

Sur la coupe stratigraphique (Fig. B.100), le tuyau en terre cuite est repérable par sa couleur très rouge. Son épaisseur, variable, est en moyenne de 5 mm. Nous voyons sur cette coupe la partie inférieure du tuyau, c'est-à-dire sa base, coupée dans le sens longitudinale, qui sépare ainsi la partie interne du tuyau, là où s'écoulait l'eau thermique lorsque celui-ci alimentait la baignoire de T4, de la partie située à l'extérieur du tuyau.

La séquence sédimentaire du tuyau d'adduction lisible dans cette coupe s'établit ainsi :

Au-dessus du tuyau en terre cuite (c.-à-d. dans la partie interne du tuyau) :

- Un dépôt de travertins d'une épaisseur variable, de moyenne inférieure à 0,5 cm, et présentant un faciès orangé et relativement poreux, sans lamination particulière = **travertin C1**.
- Un dépôt de travertin plus épais et plus diffus, à lamination extrêmement fine, de type rythmique = **travertin C2**.

En-dessous du tuyau en terre cuite (c.-à-d. à l'extérieur du tuyau) :

- Un dépôt de travertins épais et diffus, à lamination extrêmement fine, de type rythmique = **travertin C2**. Ainsi, dans la partie interne du tuyau, nous observons deux faciès différents distincts stratigraphiquement. Un premier faciès C1 se dépose à-même la surface de la paroi du tuyau en terre cuite. Puis un second faciès, le travertin C2, se met en place sur le travertin C1. Dans la partie extérieure au tuyau en terre cuite, nous observons un seul faciès de travertin, le travertin C2, tandis que le faciès C1 est absent.

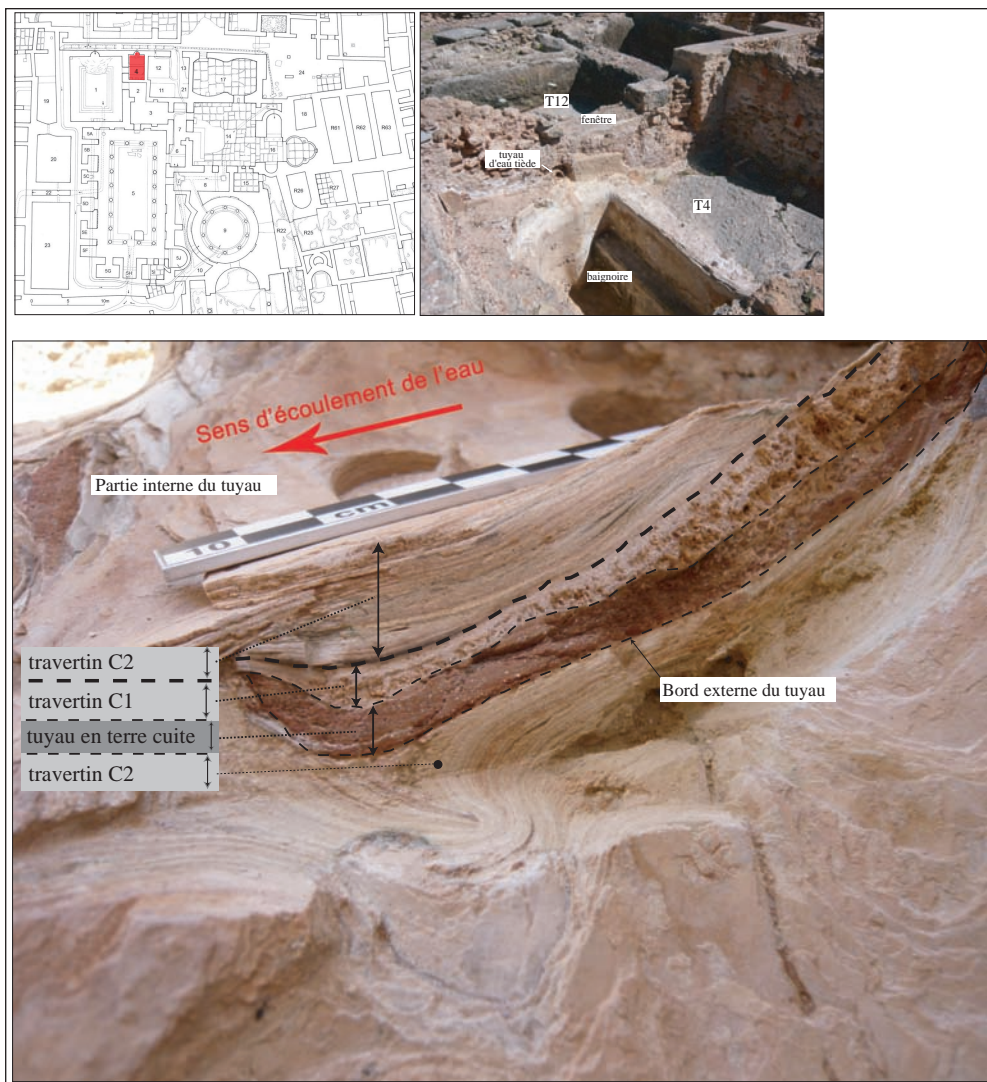


Figure B.100.
Analyse géoarchéologique du tuyau d'eau tiède de la salle T4 des thermes ; en haut : situation de la salle T4 et du tuyau provenant de T12 ; en bas : analyse stratigraphique du remplissage sédimentaire du tuyau.

L'interprétation de ces observations stratigraphiques et sédimentologiques au niveau du tuyau d'adduction d'eau thermique refroidie dans T4 nous amène à définir **deux épisodes sédimentaires**, respectivement responsables du dépôt de travertin de type C1 et du dépôt de travertin de type C2. Un premier épisode est responsable du dépôt du travertin C1, puis un second épisode sédimentaire dépose le travertin C2. Or, nous retrouvons l'épisode C1 seulement dans la partie interne du tuyau d'adduction, alors qu'il est complètement absent dans

la partie extérieure au tuyau. A l'inverse, nous retrouvons l'épisode sédimentaire dans la partie interne au tuyau et dans la partie à l'extérieur de ce même tuyau.

Ainsi, nous pouvons en conclure que l'épisode sédimentaire C1 a lieu lorsque le tuyau est encore intact, c'est-à-dire encore en utilisation pour acheminer l'eau thermique refroidie dans T4, alors que l'épisode sédimentaire C2 se met en place lorsque le tuyau d'adduction est détérioré et n'est plus utilisé (utilisable) pour l'alimentation de la baignoire de T4.

En résumé, nous proposons les interprétations chronologiques et géoarchéologiques suivantes :

- **Tuyau d'adduction en terre cuite.**
- **Travertin C1 = Phase d'utilisation du tuyau d'adduction d'eau thermique refroidie.**
- **Travertin C2 = Phase d'abandon du tuyau d'adduction d'eau thermique refroidie.**
- **Fin de la séquence = absence de travertin, fin de l'alimentation en eau thermique.**

• **Le remplissage sédimentaire du tuyau :**

Nous avons pu effectuer un carottage au centre du tuyau d'adduction dans le remplissage de travertins comblant la canalisation (éch. JO-07-56). La lecture cette carotte (Fig. B.101) confirme nos observations effectuées sur la coupe stratigraphique et nos interprétations géoarchéologiques. Le tuyau en terre cuite, de couleur rouge et de 0,6 à 0,7 cm d'épaisseur, est visible à la base de la carotte. Le faciès de travertin C1 est retrouvé, reposant à même la terre cuite correspondant au tuyau, sur une épaisseur de 0,5 cm. Enfin, le faciès de travertin C2 termine la séquence, avec une épaisseur de 0,8 cm.

Nous avons donc bien là, enregistrés dans cette séquence sédimentaire, les deux épisodes de dépôt de travertins C1 et C2, correspondant, respectivement, à la phase d'utilisation du tuyau en terre cuite puis à la phase d'abandon de ce tuyau, alors que l'eau thermique continuait de circuler.

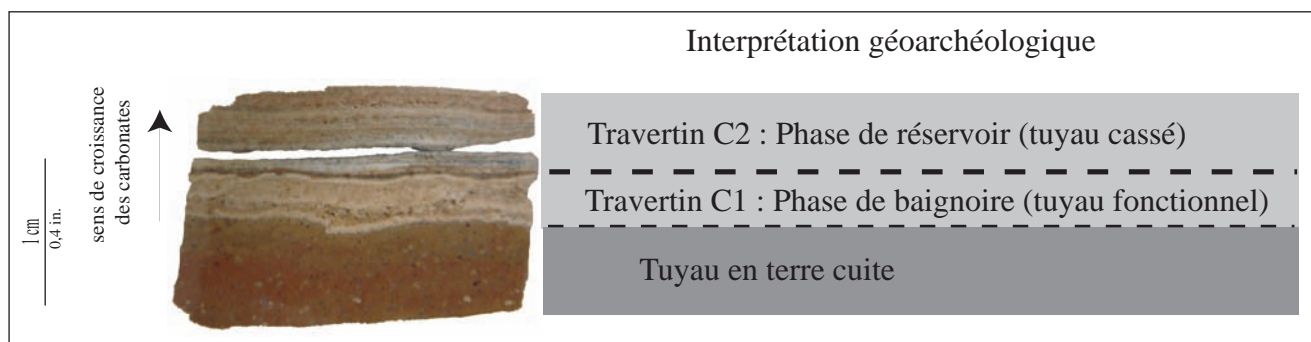


Figure B.101. Interprétation géoarchéologique de la carotte JO-07-56 prélevée dans le tuyau d'eau tiède de la salle T4.

• Les isotopes stables de l'oxygène et du carbone de la carotte JO-07-56 :

Des microprélèvements pour l'analyse des isotopes stables de l'oxygène et du carbone ont été effectués sur l'ensemble de la carotte, suivant le sens de croissance des carbonates, à un pas d'échantillonnage de 1 mm (07-56_01 à 07-56_13). Les cinq premiers prélèvements (07-56_01 à 07-56_05) concernent le faciès C1 du travertin déposé dans ce tuyau, tandis que les huit suivants (07-56_06 à 07-56_13) ont été prélevés dans le travertin à faciès C2.

L'ensemble des résultats présente une gamme de valeur en $\delta^{18}\text{O}$ de -6,65 à -5,72 ‰ PDB et en $\delta^{13}\text{C}$ de -3,66 à -0,02 ‰ PDB. Les valeurs isotopiques le long de la séquence se séparent en deux populations significativement différentes (Fig. B.102). La **première population** (JO-05-56_01 à JO-05-56_05) comprend des valeurs en $\delta^{18}\text{O}$ entre -6,65 et -6,20 ‰ PDB et des valeurs en $\delta^{13}\text{C}$ de -1,92 à -0,02 ‰ PDB et correspond au **faciès C1** des travertins du tuyau. La **seconde population** (JO-05-56_06 à JO-05-56_13) possède des valeurs en $\delta^{18}\text{O}$ entre -6,06 et -5,72 ‰ PDB et en $\delta^{13}\text{C}$ entre -3,66 et -2,19 ‰ PDB et correspond au **faciès C2** des travertins.

Le faciès C1 (Tab. 5) présente une valeur moyenne (n=5) en $\delta^{18}\text{O}$ de -6,45 ‰ PDB, avec un écart-type de 0,17, et en $\delta^{13}\text{C}$ de -0,93 ‰ PDB, avec un écart-type de 0,72. Le faciès C2 a une valeur moyenne (n=8) en $\delta^{18}\text{O}$ de -5,86 ‰ PDB, avec un écart-type de 0,12, et en $\delta^{13}\text{C}$ de -3,26 ‰ PDB, avec un écart-type de 0,45.

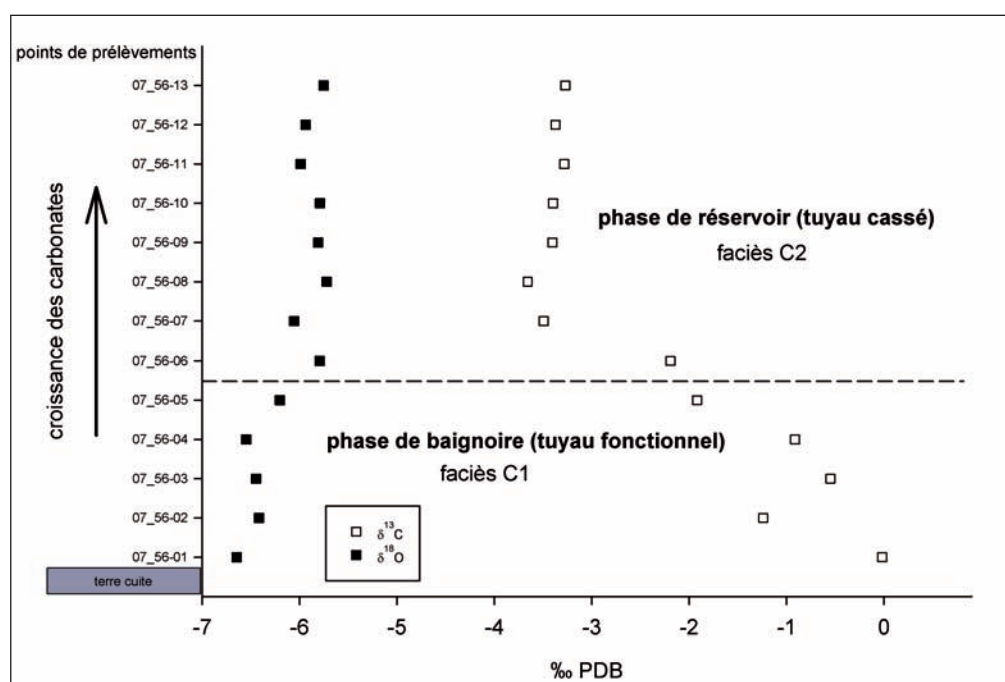


Figure B.102. Evolution de la composition isotopique (carbone et oxygène) du travertin le long de la séquence colmatant le tuyau d'eau tiède de T4.

<i>Faciès</i>	n	moyenne du $\delta^{18}\text{O}$ (‰ PDB)	écart-type du $\delta^{18}\text{O}$	moyenne du $\delta^{13}\text{C}$ (‰ PDB)	écart-type du $\delta^{13}\text{C}$
C1	5	-6,45	0,17	-0,93	0,72
C2	8	-5,86	0,12	-3,26	0,45

Tableau 5. Moyenne et écart-type des valeurs isotopiques des faciès C1 et C2 du tuyau de la salle T4.

Sur la variabilité des signaux géochimiques des faciès C1 et C2 :

Comme nous pouvons le constater sur la figure, qui présente les valeurs en $\delta^{18}\text{O}$ et en $\delta^{13}\text{C}$ le long de la séquence de croissance des carbonates (avec une résolution de 1 mm), le $\delta^{18}\text{O}$ du faciès C1 (07-56_01 à 07-56_05) demeure relativement constant, entre -6,65 et -6,20 ‰ PDB. En revanche, le $\delta^{13}\text{C}$ du faciès C1 présente une forte variabilité, avec des valeurs entre -1,92 et -0,02 ‰ PDB. Une tendance vers des valeurs plus négatives en $\delta^{13}\text{C}$ suivant le sens de croissance du carbonate se dessine.

Le $\delta^{18}\text{O}$ du faciès C2 (07-56_06 à 07-56-13) est relativement constant, et présente des valeurs légèrement plus élevées que le faciès C1, entre -6,06 et -5,72 ‰ PDB. Contrairement au $\delta^{13}\text{C}$ du faciès C1, le $\delta^{13}\text{C}$ du faciès C2 demeure constant tout au long de la croissance du travertin, et est significativement plus faible que le $\delta^{13}\text{C}$ du faciès C1, avec des valeurs entre -3,66 et -2,19 ‰ PDB.

La gamme des valeurs du faciès C1 s'inscrit pleinement dans la gamme des valeurs de la salle T12 (cf. B.II.2.1) dont l'eau refroidie alimente le tuyau. Les valeurs du $\delta^{13}\text{C}$, légèrement plus faibles sont certainement dues au mélange effectué avec l'eau thermale provenant directement de l'aqueduc, dessinant ainsi une droite de mélange des eaux entre une eau thermale refroidie et une eau chaude. Les valeurs légèrement plus élevées du $\delta^{18}\text{O}$ du faciès C2 ($\sim +0,6$ ‰) traduisent une évaporation plus importante et une eau de précipitation plus froide, expliquées par l'ouverture du tuyau alors détérioré (phase de tuyau cassé = dysfonctionnement de l'alimentation de la salle T4). Les valeurs du $\delta^{13}\text{C}$ ne dessinent plus de droite de mélange, reflétant l'arrêt de l'alimentation depuis la salle T12, certainement bouchée par les travertins se développant alors dans cette salle.

Ainsi, deux phases se dessinent retraçant l'histoire de ce tuyau, et plus généralement l'histoire de la salle T4. À une première phase de fonctionnement de la salle, caractérisée par une alimentation double en eau thermale et en eau thermale refroidie depuis la salle T12 (eau tiède), succède une phase de dysfonctionnement de la salle, marquée par l'arrêt de l'alimentation en eau tiède depuis T12, T4 perdant alors sa fonction thermale.

B.III.2.6. L'apport des analyses à haute-résolution (PIXE).

La composition élémentaire d'échantillons de travertin du site de Jebel Oust a été analysée à l'aide du dispositif AGLAE (cf. A.IV), sur des surfaces polies et avec un pas de résolution de 192 μm . Nous présentons ici l'analyse d'un échantillon de travertin (JO-07-49) prélevé dans la salle T1 des thermes¹.

La séquence de l'échantillon analysé mesure 5,8 cm de puissance et les analyses ont été effectuées dans le sens de croissance du travertin (Fig. B.103). Les teneurs en Ca le long de la séquence sont constantes et voisines de 650 000 ppm. Les teneurs en Fe oscillent entre 2500 et 15000 ppm, avec une première phase entre 0 et 4,5 cm caractérisée par des teneurs moyennes de 2500 et 5000 ppm, et une seconde phase entre 4,5 cm et 5,8 cm caractérisée par des teneurs plus élevées, entre 5000 et 15000 ppm. Les teneurs en Mg montrent une variation cyclique oscillant entre des valeurs quasi-nulles et 5000 ppm, et sont très faibles à la fin de la séquence (à partir de 4,5 cm). Les teneurs en Al montrent également une certaine cyclicité, oscillant entre 5000 ppm et 15000 ppm, avec une certaine tendance vers des valeurs plus élevées (10000 à 15000 ppm) entre 2 et 4,5 cm, et des valeurs extrêmement faibles en fin de séquence. Les teneurs en Sr sont voisines de 1000 ppm entre 0 et 4,5 cm, et s'élèvent à des valeurs voisines de 14000 ppm en fin de séquence, de 4 à 5,8 cm.

L'analyse de la composition élémentaire de l'échantillon JO-07-49 de la salle T1 permet une différenciation des faciès pétrographiques. Le faciès du début de la séquence jusqu'à 4,5 cm correspond au faciès A (cf. B.III.2.1) et est caractérisé par des fortes teneurs en Ca, des teneurs moyennes en Mg, Al et Fe, et des faibles teneurs en Sr. Le second faciès, de 4,5 cm à la fin de la séquence, correspond au faciès E défini dans les thermes de Jebel Oust (cf. B.III.2.1) et est caractérisé par de fortes en valeurs en Ca, en Sr et en Fe, et des valeurs très faibles en Mg et Al.

La transition entre le faciès A (à lamines claires et sombres) et le faciès E (à lamines oranges) est pleinement définie par l'analyse élémentaire, caractérisée par une augmentation significatives des teneurs en Sr, en parallèle d'une hausse des teneurs en Fe, alors que Ca reste quasiment constant, et que les teneurs en Mg et Al chutent significativement, atteignant des valeurs inférieures à 1000 ppm. La composition élémentaire du travertin a ainsi enregistré la transition entre les faciès A et E, c'est-à-dire entre une eau gérée et une eau non-gérée, alors très chaude, et caractérisée par une forte concentration en Fe et en Sr.

En parallèle, les teneurs en certains éléments montrent une certaine cyclicité, rappelant la lamination du sédiment. C'est le cas du Mg et du Al pour la séquence de faciès A, du Fe sur l'ensemble de la séquence, et du Sr sur la séquence du faciès E. Ces cyclicités de la composition élémentaire reflètent une variabilité naturelle de la source, de son débit et de sa température, liée à la variabilité climatique saisonnière (saison humide et saison froide) et pluri-annuelle.

¹ Les résultats de l'analyse de la composition élémentaire de l'échantillon JO-07-49 sont donnés en annexe (cf. Annexes D et Dbis).

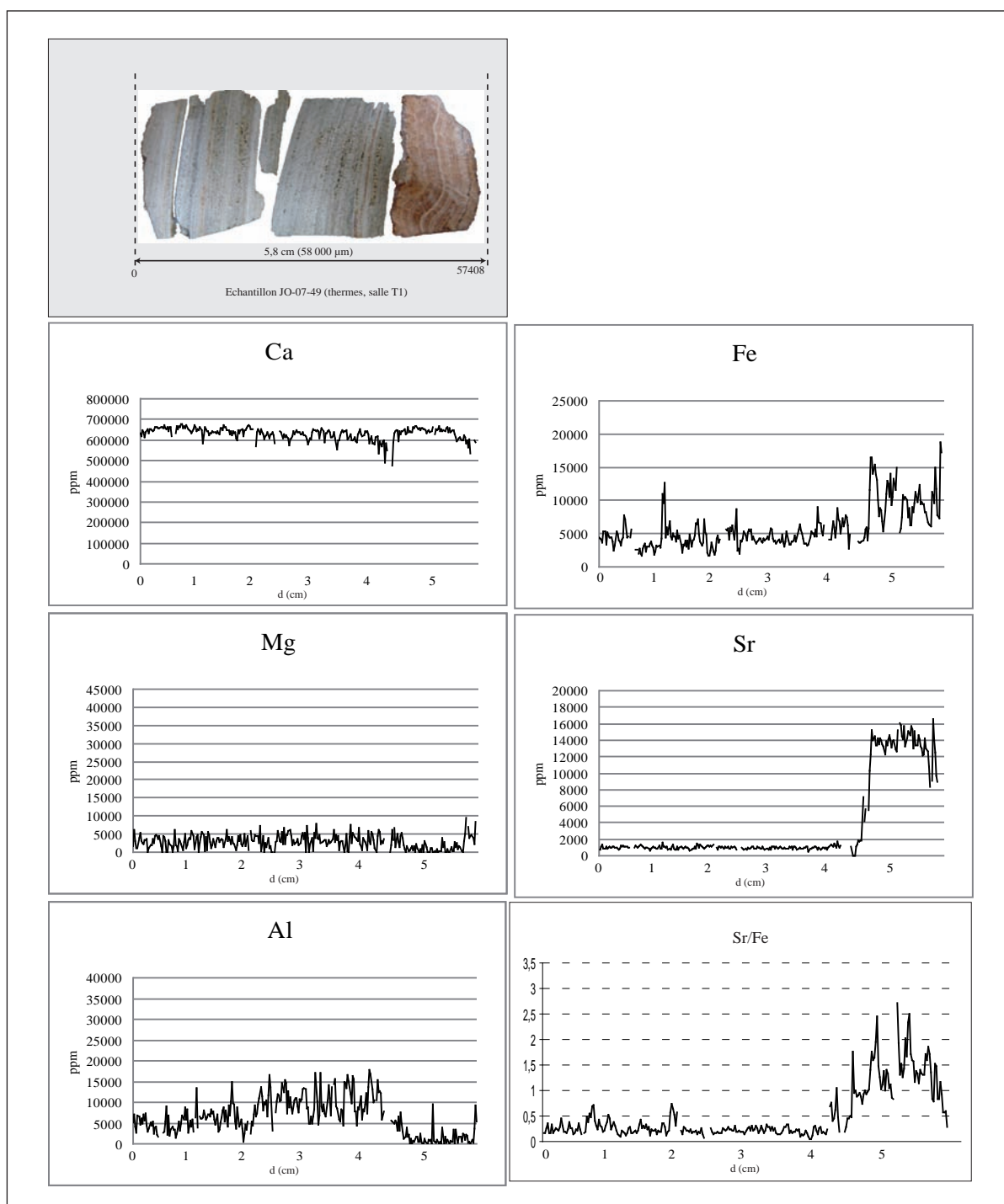


Figure B.103. Graphiques des concentrations en Ca, Mg, Al, Fe et Sr, et du rapport Sr/Fe en fonction de la distance (en cm) depuis la base de la séquence mesurées par l'analyse PIXE sur l'échantillon JO-07-48 de la salle T1 des thermes de Jebel Oust. Une photo de l'échantillon est présentée (en haut).

B.IV. L'ANALYSE DU CONTENU SPORO-POLLINIQUE DES TRAVERTINS : UNE FENÊTRE SUR LE PAYSAGE VÉGÉTAL ANTIQUE DE JEBEL OUST.

« Reste à parler d'êtres qui ne sont pas non plus dépourvus d'âme,
puisque rien ne vit sans âme, des productions végétales de la terre. »

Pline l'Ancien (I^{er} s. ap. J.-C.)

Nous avons vu précédemment (cf. A.I.3) le grand intérêt que représentent les dépôts de travertin pour une reconstitution paléoenvironnementale, en particulier par l'intermédiaire d'analyses du contenu palynologique préservé à l'intérieur de ces sédiments. Différents travaux ont pu montrer le potentiel d'archives sédimentaires que représente les travertins *s.l.* pour obtenir un signal palynologique fiable contemporain de la formation des dépôts, que ce soit pour les spéléothèmes (p. ex. Renault-Miskovski et Texier, 1980), les tufs calcaires (Andrews, 2006 ; Rousseau *et al.*, 2006), ou les travertins (Vermoere *et al.*, 1999).

Des analyses palynologiques ont été effectuées sur quelques échantillons de travertin préservé dans les structures archéologiques du site de Jebel Oust. La chaîne opératoire est exposée dans un premier paragraphe, avant que ne soit abordé le potentiel de conservation des grains de pollen dans les travertins de Jebel Oust, puis de commenter les résultats de l'analyse pollinique. Une brève synthèse sur ces résultats inédits viendra conclure l'ensemble de ces analyses polliniques sur les *travertins anthropiques* de Jebel Oust.

B.IV.1. Méthodologie de la palynologie et chaîne opératoire en contexte archéologique.

Parmi les disciplines paléobotaniques permettant une approche et une étude paléoenvironnementales, la palynologie (l'étude des grains de pollen conservés dans les sédiments) est sans doute la plus utilisée sur les sites archéologiques. La démarche d'une analyse palynologique peut se traduire par une formule relativement simple : « restituer le couvert végétal en un point et à une époque donnés à travers le contenu en pollens et en spores des sédiments déposées pendant cette période » (Richard, 1994). Cependant, il est nécessaire de ne pas oublier les contraintes et les limites méthodologiques d'une analyse palynologique, qui s'appuie sur trois hypothèses définies par Reille (1990) :

- la pluie pollinique représente fidèlement la végétation ;
- le dépôt et la conservation des pollens et des spores ne modifient pas l'image de la pluie pollinique ;
- le prélèvement des échantillons, l'extraction, le comptage et la détermination des pollens et des spores restituent fidèlement l'image de la pluie pollinique.

La première hypothèse a pu être validée par de nombreux travaux qui ont permis de contrôler les relations existant entre la pluie pollinique et la végétation actuelle. La seconde hypothèse concerne directement l'ar-

chéologie et les milieux et conditions de conservation du matériel sédimentaire et biologique. Elle aboutit à s'interroger sur la fiabilité des analyses effectuées en contexte de site archéologique à des fins de reconstitution paléoenvironnementale et englobe les problèmes de pollution des couches d'occupation par des pollens involontairement apportés par l'homme et susceptibles d'influencer les résultats. Enfin, la troisième et dernière hypothèse n'est qu'une question de technique et concerne uniquement les moyens de prélèvements et de préparation employés par le pollenanalyste.

A ces contraintes méthodologiques viennent s'ajouter les contraintes liées au contexte de site archéologique susceptible de créer plusieurs phénomènes influant sur la chaîne opératoire (fig. B.104). Les activités humaines, aussi diverses qu'elles soient, jouent un rôle important dans la conservation du « signal archéo-pollinique ». La mise en culture d'un milieu, la consommation, le stockage de certaines denrées (céréales), ainsi que le type de structures archéologiques et leur contexte (milieu clos, milieu ouvert à la lumière, structures hydrauliques, etc.), vont perturber le cortège pollinique local.

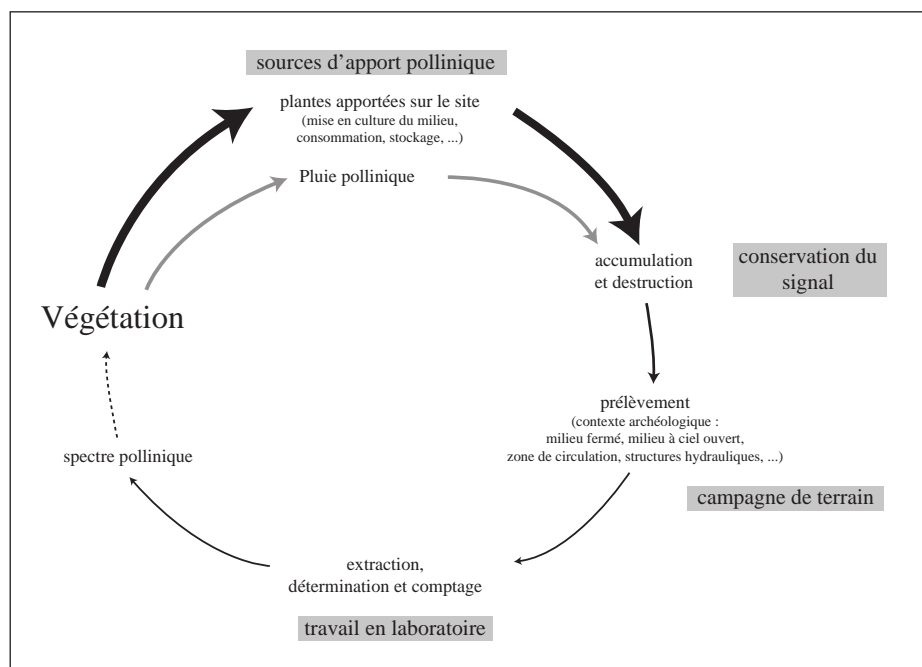


Figure B.104. Chaîne opératoire d'une analyse palynologique en contexte archéologique (d'après Richard, 1994).

B.IV.2. Des grains de pollen préservés dans les travertins de Jebel Oust ?

B.IV.2.1. Une stratégie raisonnée de l'échantillonnage : un panel d'échantillons représentatif.

La première étape de notre démarche palynologique a été de vérifier si des grains de pollen et des spores sont conservés dans les dépôts de travertins du site archéologique de Jebel Oust ; en d'autres termes, savoir si les travertins de Jebel Oust sont des marqueurs biosédimentaires potentiels, et fiables, de l'environnement pollinique antique. Pour cela, un panel d'échantillons représentatif de la diversité des faciès sédimentaires définis sur le site de Jebel Oust (cf. B.II.2 et B.III.2.1) et provenant de localisations différentes (en particulier dans l'édifice thermal) nous servira de support sédimentaire pour l'analyse palynologique.

Pour cette étude, un ensemble de douze échantillons ont été sélectionnés, dont onze proviennent du secteur thermal, et un (JO-07-87) provient de l'aqueduc thermal, prélevé à mi-pente (secteur 20). Parmi les échantillons provenant des thermes, deux présentent un faciès laminé de type A, l'un appartenant aux dépôts laminés revêtant les marches de la salle T1 (JO-07-84) et le second aux dépôts des marches de la salle circulaire T9 (JO-05-33). Un échantillon représentatif du faciès B (JO-07-45) a été prélevé dans la salle T5. Ensuite, un ensemble de cinq échantillons appartiennent au faciès de type C, défini dans les réservoirs de refroidissement de l'eau thermale que sont : les salles T12 (JO-07-99) et T13 (JO-07-103) pour la « cour des réservoirs », et les salles T19 (JO-07-106), T20 (JO-07-104) et T23 (JO-07-107) pour les réservoirs situés au sud. Enfin, un échantillon provient de l'amas final de travertin déposé dans la salle T1 (JO-07-112) et du travertin à lamines oranges (faciès E) préservés en T1 (JO-07-52) ; un dernier (JO-07-130) a été prélevé dans la canalisation (faciès F) alimentant en eau thermale la salle T5 lors de la phase II des thermes.

L'ensemble de ces échantillons ont fait l'objet d'une analyse de leur contenu sporo-pollinique en laboratoire, suivant un protocole scientifique bien défini (cf. A.IV).

B.IV.2.2. Le contexte chronologique des échantillons.

La datation des travertins prélevés pour l'analyse palynologique est basée sur le contexte archéologique de chacun des échantillons et s'appuie sur les phases archéologiques pendant laquelle le travertin s'est déposé. L'échantillon JO-07-130 provient de la canalisation alimentant en eau thermale la salle T5 lors de la phase II des thermes. L'échantillon de l'aqueduc thermal prélevé à mi-pente du site (JO-07-87) est daté de la troisième phase définie dans la synthèse chronologique du complexe sanctuaire/source (cf. B.I.1.3), lors de l'état 2b du captage inférieur. Les échantillons prélevés dans le travertin recouvrant les marches des trois piscines T1, T5 et T9) sont contemporains de la phase IV des thermes, daté du début du V^e siècle. Les échantillons prélevés dans les travertins préservés dans les réservoirs de refroidissement datent, au moins, de la phase III des thermes pendant laquelle les réservoirs sont construits, mais plus certainement de la phase postérieure, la phase IV. Enfin, l'échantillon JO-07-112 a été prélevé dans l'amas final de travertin, qui se développe dans la salle T1 lorsque celle-ci est abandonnée en tant que salle thermale.

B.IV.2.3. Le contenu sporo-pollinique des travertins de Jebel Oust.

L'analyse du contenu sporo-pollinique des travertins du site de Jebel Oust fait état d'une conservation différentielle des grains de pollen et des spores, suivant le faciès sédimentaire des travertins et la localisation de ces derniers (Fig. B.105). Le cortège pollinique s'est révélé stérile pour l'échantillon JO-05-52 (**0 grain/gr_{séd}**)¹, provenant des dépôts à lamines oranges préservés dans la salle T1. Le cortège est relativement faible, et donc sans grande valeur paléoenvironnementale, pour les échantillons JO-07-87 (**56 grains/gr_{séd}**), provenant de l'aqueduc à mi-pente, et JO-07-112 (**72 grains/gr_{séd}**), provenant de l'amas final de travertin préservé en T1.

¹Nombre de grains par gramme de sédiments.

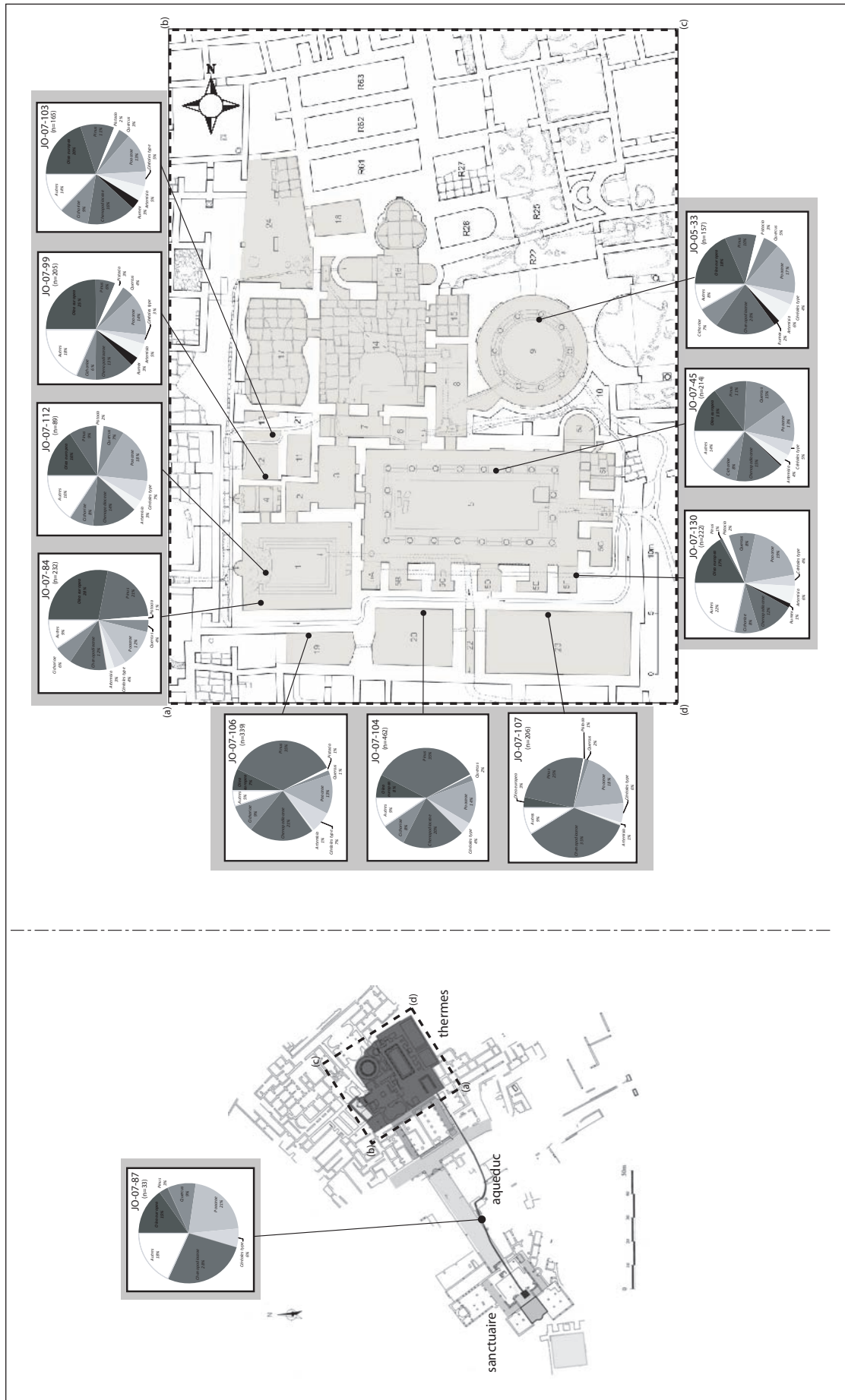


Figure B.105. Contenu pollinique des espèces végétales représentatives d'échantillons de travertins anthropiques du site de Jebel Oust.

Cinq échantillons possèdent un contenu pollinique relativement moyen. Il s'agit des échantillons JO-07-45 (**146 grains/gr_{séd}**) et JO-05-33 (**109 grains/gr_{séd}**) de la salle T5, JO-07-103 (**147 grains/gr_{séd}**) de la salle T13, et JO-07-106 (**166 grains/gr_{séd}**) de la salle T19 et JO-07-107 (**199 grains/gr_{séd}**) de la salle T23.

Enfin, quatre échantillons présentent une valeur relativement élevée, et donc satisfaisante pour des conclusions paléoenvironnementales¹, de leur cortège pollinique. Parmi ceux-ci, deux proviennent des piscines T1 et T5, avec, respectivement, les échantillons JO-07-84 (**290 grains/gr_{séd}**) et JO-07-130 (**355 grains/gr_{séd}**). Les deux autres échantillons appartiennent aux réservoirs de refroidissement à ciel ouvert T12 (JO-07-99 : **336 grains/gr_{séd}**) et T20 (JO-07-104 : **506 grains/gr_{séd}**).

Plus généralement, le cortège pollinique s'est révélé relativement plus important, et donc plus fiable pour reconstituer le couvert végétal, pour les échantillons de travertin provenant des réservoirs à ciel ouvert, avec une concentration pollinique moyenne de **271 grains/gr_{séd}**, que pour les échantillons de travertin prélevés dans les piscines, qui présentent une concentration pollinique moyenne de **162 grains/gr_{séd}**.

B.IV.3. Résultats de l'analyse palynologique des travertins de Jebel Oust.

Suite à notre exposé concernant la conservation différentielle des pollens et des spores dans les *travertins anthropiques* du site de Jebel Oust, intéressons-nous maintenant aux résultats obtenus par les analyses palynologiques, le comptage et la détermination des pollens². Nous pouvons éliminer immédiatement l'échantillon JO-07-52, qui s'est malheureusement révélé stérile (n=0 grain). Les deux échantillons à faible cortège pollinique, JO-07-112 et JO-07-87, montrent un total de grains déterminés de 89 et 33, respectivement. Les échantillons provenant des travertins recouvrant les marches de piscines T1, T5 et T9, respectivement JO-07-84, JO-07-45 et JO-05-33, montrent un total de grains de pollen de 232, 214 et 157. Le travertin déposé dans la canalisation alimentant la salle T5 lors de la phase II des thermes (JO-07-130) présente un total de 222 grains. Enfin, pour les échantillons de travertin déposé dans les réservoirs de refroidissement, nous avons un nombre total de 205 et 165 grains concernant la « cour des réservoirs », T12 et T13, et de 339, 462 et 206 grains pour les réservoirs situés au sud, T19, T20 et T23.

Parmi ces valeurs de nombre de grains de spores et pollens pour chaque échantillon, prenons le temps maintenant de regarder et séparer les pollens d'arbres et d'arbustes (*A.P.* = *Arborean Pollen*) des pollens représentant les herbacées (*N.A.P.* = *Non-Arborean Pollen*). Les valeurs de l'ensemble des échantillons sont reportées sur un graphique *A.P.* / *N.A.P.* (Fig. B.106). Dans l'ensemble, les pollens d'arbres et d'arbustes représentent entre 27 et 56 % du cortège pollinique :

¹Des études ont montré qu'au-delà de 200 grains par échantillon, voir 150 dans certains cas, les résultats étaient statistiquement significatifs (Richard, 1999).

²Les résultats de l'analyse palynologique des travertins de Jebel Oust sont donnés en annexe (cf. Annexe F).

- JO-07-84 (n=232 grains) : 56 % *a.b.* (131 grains) / 44 % *n.a.p.* (101 grains)
- JO-07-112 (n=89) : 36 % *a.b.* (32) / 64 % *n.a.p.* (57)
- JO-07-130 (n=222) : 35 % *a.b.* (77) / 65 % *n.a.p.* (145)
- JO-07-45 (n=214) : 43 % *a.b.* (93) / 57 % *n.a.p.* (121)
- JO-05-33 (n=157) : 38 % *a.b.* (59) / 62 % *n.a.p.* (98)
- JO-07-99 (n=205) : 47 % *a.b.* (96) / 53 % *n.a.p.* (109)
- JO-07-103 (n=165) : 43 % *a.b.* (71) / 57 % *n.a.p.* (94)
- JO-07-106 (n=339) : 46 % *a.b.* (155) / 54 % *n.a.p.* (184)
- JO-07-104 (n=462) : 46 % *a.b.* (212) / 54 % *n.a.p.* (250)
- JO-07-107 (n=206) : 30 % *a.b.* (62) / 70 % *n.a.p.* (144)
- JO-07-87 (n=33) : 27 % *a.b.* (9) / 73 % *n.a.p.* (24)

Ainsi, l'aire de répartition des échantillons analysés s'étale majoritairement au-dessus de la ligne modélisant 50% de pollen d'arbres/arbustes et 50% d'herbacées. Seul un échantillon (JO-07-84) se situe en-dessous de cette ligne d'équilibre, et deux (JO-07-107 et JO-07-87) sont au-dessus de la ligne modélisant 33% d'arbres/arbustes et 66% d'herbacées.

Plus généralement, la moyenne de tous les échantillons est de **43%** pour la quantité de pollen d'**arbres/arbustes**, et de **57%** pour la quantité de pollen d'**arbustes**.

Afin de détailler les résultats de l'analyse palynologique des travertins anthropiques de Jebel Oust, les quantités des espèces les plus importantes et les plus significatives¹ sont présentées dans des graphiques rapportant chacun à la localisation de l'échantillon concerné (Fig. B.105). En marge de cela, les spectres polliniques représentant la distribution de ces espèces présentes dans le cortège pollinique de chaque échantillon sont présentés (Fig. B.107).

Parmi les espèces d'arbres présentes dans le cortège pollinique, les pollens d'olivier (*Olea europea*) et de pin (*Pinus*) sont majoritaires, représentant à chaque fois plus de 20% du cortège pollinique total (c.-à-d. *A.P.* et *N.A.P.*). L'olivier atteint un maximum de quantité dans les échantillons JO-07-84 (28%) et JO-07-99 (25%), et un minimum pour l'échantillon JO-07-107 (3%). Le pin atteint une quantité maximale dans l'échantillon JO-07-106 (35%) ; il est présent dans une moindre mesure dans l'échantillon JO-07-84 (21%) et est en quantité très faible dans les échantillons JO-07-130 (1%) et JO-07-87 (3%).

Le chêne (*Quercus*) atteint entre 5 et 10% d'abondance dans les échantillons dans lesquels il est présent, avec un pic à 14% dans l'échantillon JO-07-45. D'autres espèces d'arbres sont également présentes mais en faible quantité, comme le pistachier (*Pistacia*), voir en infime quantité, tel le noisetier (*Corylus*) ou l'Aulne (*Alnus*).

¹Ces espèces sont : *olea europea*, *pinus*, *pistacia*, *quercus*, *poacea*, *artemisia*, *rumex*, *chenopodiaceae*, *cichoriae*, et les céréales.

Les herbacées (*N.A.P.*) montrent une diversité d'espèces plus importante que les arbres. Au sein de cette diversité, les poacées (*Poaceae*) atteignent une abondance moyenne de 15%, avec une valeur maximale de 21% dans l'échantillon JO-07-87 et une valeur minimum de 12% dans l'échantillon JO-07-84. Les céréales sont présentes dans tous les échantillons analysés, avec une quantité voisine de 5% du cortège pollinique total. L'armoise (*Artemisia*) est présente dans tous les échantillons analysés, mais est faiblement représentée avec une quantité toujours largement inférieure à 5%, excepté pour les échantillons JO-07-130 et JO-05-33 (6%). L'oseille (*Rumex*) n'est présente que dans cinq échantillons du panel étudié, et en très faible quantité ($\leq 3\%$). La famille des Chenopodiaceae (*Chenopodiaceae*) est très représentée dans le cortège pollinique de chaque échantillon, entre les 12% des échantillons JO-07-84 et JO-07-130 et les 35% de l'échantillon JO-07-107. Enfin, les Cichoriées (*Cichoriae*) présentent des valeurs voisines de 8% dans la plupart des cortèges polliniques analysés, mais sont absentes dans les échantillons JO-07-107 et JO-07-87.

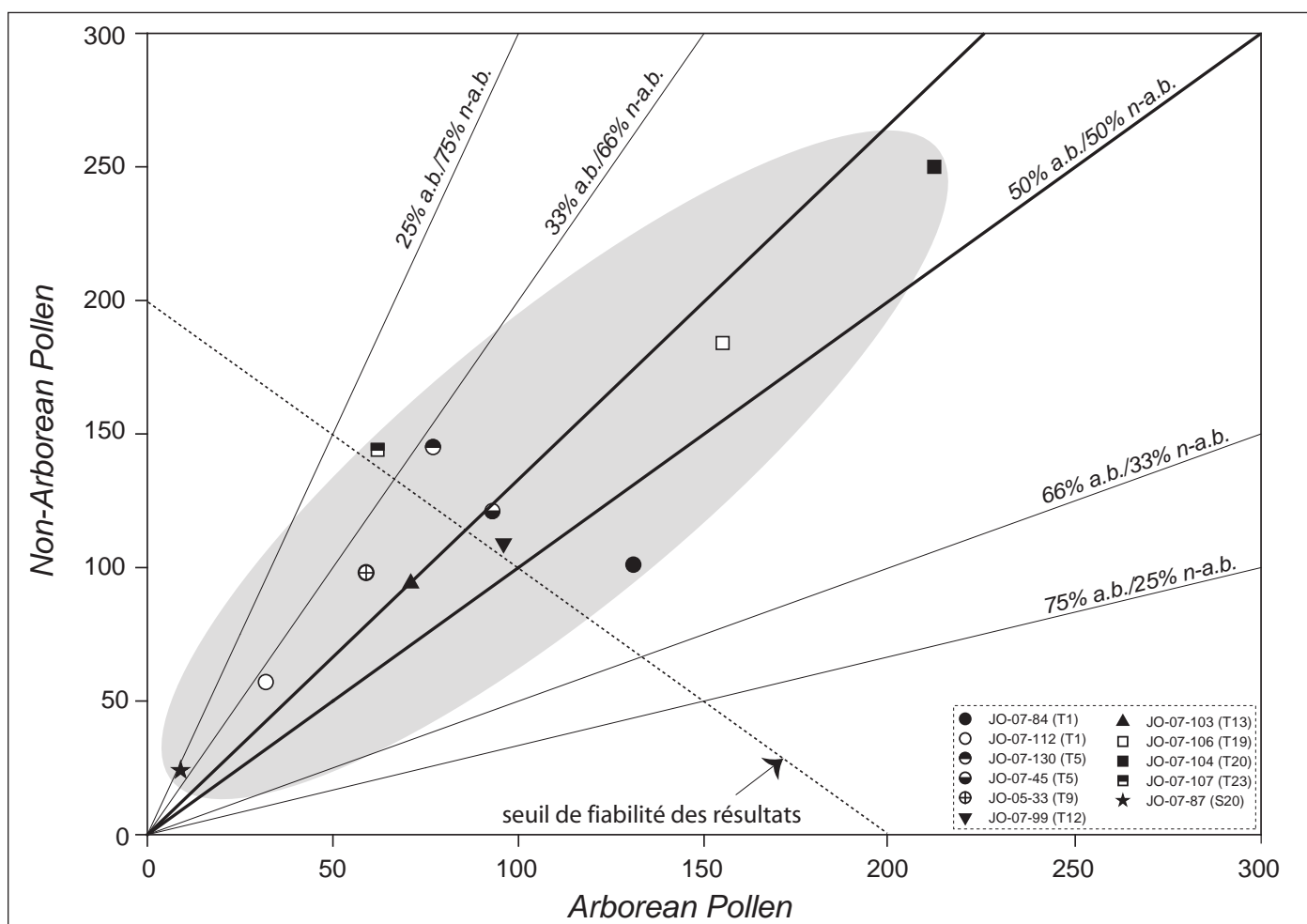


Figure B.106. Nombre de grains de pollen (A.P. et N-A. P.) dans des échantillons de travertins anthropiques de Jebel Oust.

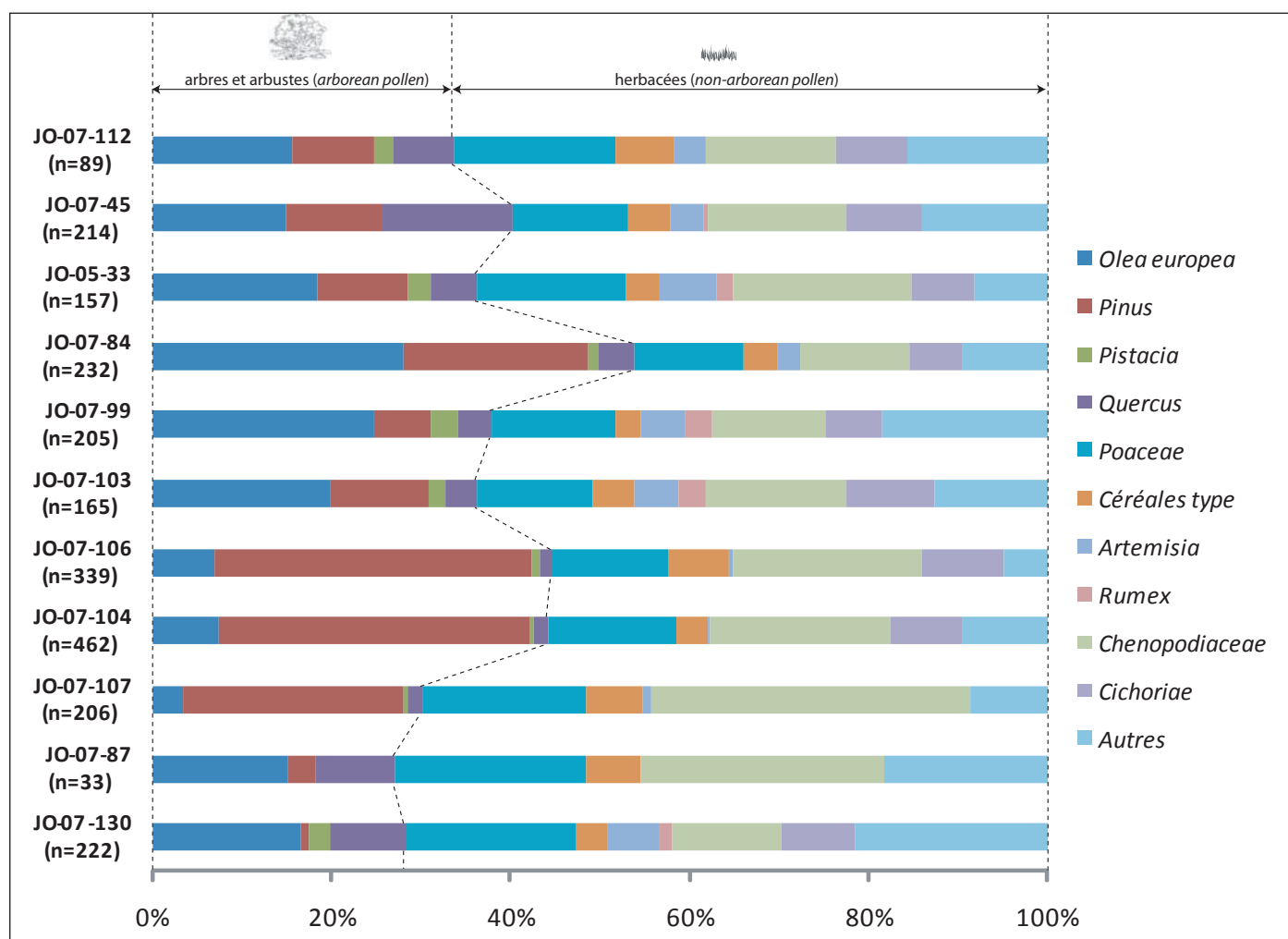


Figure B.107. Cortège pollinique (ramené en pourcentage) d'échantillons de travertins anthropiques du site de Jebel Oust.

B.IV.4. Commentaires des résultats de l'analyse palynologique des *travertins anthropiques* de Jebel Oust.

Les résultats de l'analyse palynologique effectuée sur un panel de douze échantillons de travertin prélevés dans les structures archéologiques du site de Jebel Oust nous permettent de proposer plusieurs arguments pour reconstituer l'environnement végétal antique.

B.IV.4.1. Une conservation différentielle dans le panel d'échantillons.

Si des échantillons de travertin se sont révélés stériles (JO-07-52) ou contenant très peu de grains de pollen et de spores (JO-07-87 et JO-07-112), certains montrent une conservation convenable, voir satisfaisante. Quatre échantillons (JO-07-84, JO-07-99, JO-07-104 et JO-07-130) possèdent une concentration en grains de pollen et de spores¹ supérieur à 200 grains/gr_{séd}, et cinq échantillons (JO-07-45, JO-05-33, JO-07-103, JO-07-106 et JO-07-107) ont un nombre de pollens et de spores en valeur absolu compris entre 100 et 200 grains/gr_{séd}.

¹Nombre de grains conservés par gramme de sédiment.

Nous voyons ainsi que la conservation différentielle, entre les différents échantillons de travertin, des grains de pollens et des spores ne s'expliquent pas par la nature, la fonction et l'architecture de la structure archéologique. En effet, parmi les quatre échantillons qui montrent une grande concentration pollinique, un spécimen provient d'une piscine couverte par un toit (T1), un second provient d'une piscine à ciel ouvert (T5), et deux appartiennent à des réservoirs de refroidissement dans lesquels l'eau thermique stagne à l'air libre. S'il paraît évident que les zones de stockage de l'eau à l'air libre sont des récepteurs plus importants (la concentration est plus importante dans les réservoirs à ciel ouvert), les travertins des piscines, couvertes par un toit (T1) ou à ciel ouvert (T5), représentent également un piège idéal de ces marqueurs biologiques, le facteur primordiale de dispersion et d'accumulation étant la circulation de l'eau dans ces structures.

En marge de cette conservation différentielle entre les échantillons de travertin, et en parallèle du volume de sédiment traité pour l'analyse de chaque échantillon, le nombre total de grains de pollen déterminés a atteint, pour la grande majorité des échantillons, la valeur de 200 grains, taux statistiquement significatif, défini par de nombreux calculs (Richard, 1999). Certains échantillons connaissent un nombre total de grains voisin de 150, taux considéré comme acceptable pour le comptage des grains de pollen. Ainsi, les travertins du site de Jebel Oust apparaissent comme **des archives sédimentaires fiables** pour la préservation des grains de pollen et de **l'enregistrement de l'environnement végétal**.

B.IV.4.2. Un paysage végétal ouvert, sec et anthropisé.

La proportion arbres/arbustes et herbacées dans les spectres polliniques de Jebel Oust, nettement en faveur de ces dernières (57% d'herbacées, 43% d'arbres et arbustes), reflète **un milieu** relativement **ouvert** environnant le site antique.

Parmi les arbres présents, il faut noter la domination de l'olivier et du pin dans les spectres polliniques. Cependant, les pourcentages élevés trouvés dans les échantillons provenant des réservoirs à ciel ouvert ne sont sans doute pas représentatifs de la végétation locale mais peuvent témoigner d'apports plus lointains. C'est également le cas pour le chêne, dont les enregistrements atteignent entre 5 et 10% d'abondance et sont à rapprocher d'apports lointains de la végétation forestière des étages humides et subhumides du nord de la Tunisie. Des espèces, comme le pistachier, sont également présentes en faible quantité dans les spectres polliniques, tandis que d'autres, telles que l'aulne et le noisetier, occupent une place quasi-anecdotique dans le couvert végétal régional.

Ces résultats confirment la présence de l'olivier (*Olea europea*) et sa prééminence sur les pistachiers (*Pistacia*) en Afrique du Nord dès l'époque romaine, que des études palynologiques antérieures suggéraient déjà (Marquer *et al.*, 2008 ; Brun, 1992).

Les taxons d'herbacées offrent une certaine lumière sur l'écosystème local. Un rapport privilégié entre les activités humaines et les graminées (*Poaceae*) peut être discuté, au vu de leur abondance voisine de 15% dans les

spectres polliniques. Ce taux élevé de fréquence des *Poaceae* reflète certainement un apport anthropique intentionnel. La présence remarquée de céréales (environ 5% du spectre pollinique global, dont des échantillons significativement représentatifs) témoigne d'une culture céréalière relativement intense autour du site. Ces plantes étant connues pour disperser très peu leurs grains de pollen, nous pouvons en déduire que cette culture céréalière s'exerçait, entre autre, à proximité immédiate du site. L'abondance importante des Chenopodiacées (*Chenopodiaceae*) marque également des apports volontaires et souligne l'influence anthropique sur le signal pollinique.

La présence des Cichoriées (*Cichoriae*) avec un taux de 8% amène une certaine interrogation. Les grains de pollen de ces végétaux sont connus pour être particulièrement résistants à la corrosion et peuvent ainsi amener un taux anormalement élevé de ce type de grains dans les diagrammes polliniques, ce qui engendre une exagération de l'impression d'ouverture du paysage (Richard, 1999). Néanmoins, ces plantes peuvent provenir d'un milieu de prairie et refléter une certaine ouverture du milieu, comme cela semble être le cas à Jebel Oust. L'oseille (*Rumex*) et l'armoise (*Artemisia*) sont très faiblement représentées mais témoignent néanmoins de la présence de mauvaises herbes à proximité de l'occupation humaine, faisant part d'un milieu anthropisé. La présence marquée au sein des spectres polliniques d'herbacées steppiques reflète un milieu écologique relativement sec. En particulier, la présence de l'armoise dans l'environnement végétal de Jebel Oust est à mettre en parallèle avec la croissance de cette espèce végétale mise en évidence à la fin de l'époque romaine en Tunisie (Brun, 1992) et liée à un processus de steppisation et d'aridification qu'il est encore délicat à interpréter (aridification liée à une dégradation anthropique et/ou d'origine climatique).

Les caractéristiques polliniques des espèces herbacées traduisent **un paysage largement anthropisé et relativement sec**, avec la présence particulière de l'armoise et d'autres espèces végétales liées à des zones de pâture ou de culture. Enfin, notons, dans le spectre pollinique de Jebel Oust, l'absence remarquable de la vigne.

Conclusion.

L'analyse du contenu pollinique de quelques travertins anthropiques préservés sur le site archéologique de Jebel Oust ont permis d'appréhender la conservation différentielle des grains de pollens et de spores et mettre en lumière un état ponctuel de l'environnement végétal à l'époque antique. Les travertins présentant le plus fort potentiel sont ceux préservés dans les grands réservoirs de la façade sud des thermes.

Leur contenu pollinique reflète convenablement le paysage agraire tunisien, caractérisé par la présence d'oliviers et de céréales. La vigne est à priori absente ou rare de ce paysage, car très peu retrouvée dans les pollens. Il s'agit d'un paysage assez ouvert, largement anthropisé, avec moins de 50% de couverture boisée et une végétation majoritairement liée aux activités humaines, comme la culture de l'olivier et la culture céréalière.

B.V. SYNTHÈSE GÉOARCHÉOLOGIQUE DES *TRAVERTINS ANTHROPIQUES* DU SITE DE JEBEL OUST.

B.V.I. Un géosystème entièrement anthropisé dès le début de notre ère.

La mise en place de travertins naturels sur le versant du jebel Oust traduit le fonctionnement de la source chaude avant son exploitation, qui surgissait alors à l'air libre sur le versant. A cette phase naturelle correspond le développement sur le versant d'un lobe de travertins dont l'extension spatiale a pu être reconstituée par l'identification des dépôts au sein des structures archéologiques et d'affleurements en marge du site. La morphologie en lobe est typique d'un dépôt de travertin en pente douce dont l'épaisseur s'accroît progressivement vers l'aval. À Jebel Oust, l'épaisseur du travertin naturel est de quelques dizaines de centimètres au niveau de l'évent thermal et atteint plusieurs mètres de puissance dans la partie basse du versant.

L'exploitation de la source chaude par les Romains, dont les premiers témoins datent du début de notre ère, va bouleverser ce modèle. A un modèle unique de dépôt de pente succède une multitude de modes de dépôt que reflète une grande diversité des morphologies et des faciès des travertins en relation avec les structures humaines depuis l'amont (sanctuaire et aqueduc) jusqu'en aval (secteur thermal). La transition entre le travertin naturel à des travertins multiples et caractéristiques s'explique par l'action humaine et un contrôle anthropique sur la source chaude et les dépôts sédimentaires associés, et justifie pleinement le terme de *travertins anthropiques* sur le site de Jebel Oust. Leur mise en place et leurs caractéristiques géomorphologiques et géologiques sont entièrement contrôlées par l'Homme, et peuvent être ainsi catégorisés au sein des sédiments anthropiques secondaires définis par Petit (2006).

En parallèle du contrôle anthropique de la dynamique sédimentaire du versant de Jebel Oust, nous avons pu mettre en évidence un contrôle du système hydrogéologique régional. La présence de structures surcreusées dans le substrat du captage antique, similaires à celles observées dans le captage actuel permettant un écoulement continu des eaux lors des périodes d'étiage, témoigne de la virtuosité des ingénieurs romains et d'une connaissance certaine des variations saisonnières du niveau hydrostatique. Ce contrôle du système hydrologique perdure jusqu'au tarissement de la source chaude, certainement à la fin du VI^e siècle, qui s'explique soit par un événement tectonique (séisme) qui a modifié le parcours souterrain de l'eau, soit par une surexploitation et/ou une période de sécheresse ayant abaissé la nappe à un niveau critique.

B.V.II. L'histoire et l'exploitation de la source chaude.

B.V.II.1. Un culte de source à l'époque romaine.

L'exploitation de la source chaude par l'Homme débute dès le début de notre ère avec l'installation d'un pre-

mier lieu de culte romain autour de l'évent thermal. De ce premier état très peu de témoins archéologiques et sédimentaires nous sont parvenus, du fait des aménagements postérieurs. Lors d'une phase de monumentalisation du sanctuaire, certainement au cours de la seconde moitié du II^e s. apr. J.-C., le captage est approfondi jusqu'à une grotte hydrothermale d'où sourdait l'eau chaude. Les dépôts associés à cet état, identifiés dans le colmatage de l'aqueduc qui acheminait l'eau en contrebas, font état d'un environnement de sédimentation fermé et confiné. L'évent thermal était alors recouvert par un ensemble de constructions humaines, que sont l'escalier et le pronaos du temple, soutenus par une voûte surplombant la cavité. Ce traitement particulier de la source thermique témoigne d'un culte de ses eaux. L'eau chaude est sacralisée et est rendue inaccessible dans la zone cultuelle du site.

B.V.II.2. Une exploitation différente à l'époque paléochrétienne.

La transformation du lieu sacré vers la fin du IV^e siècle, suite à l'édit de Gratien et de Théodose, voit l'installation d'une église paléochrétienne et d'un baptistère, et s'accompagne d'une modification radicale du captage. L'effondrement des structures surplombant la cavité thermique, qui peut s'expliquer par l'extrême fragilité du substrat sur lequel elles étaient fondées, entraîne l'ouverture du milieu de sédimentation. L'eau chaude sort à nouveau à l'air libre au niveau de l'évent et permet la précipitation de travertin dès la source. L'église est installée non pas dans la cour même du temple romain, comme c'est le cas sur le site voisin de *Thuburbo Majus*, mais est décalée vers le nord du fait de la présence d'un vide imposant (« puits ») au point de surgissement de la source.

B.V.III. Les *travertins anthropiques* de thermes antiques de Jebel Oust.

Les *travertins anthropiques* déposés dans l'édifice thermal antique de Jebel Oust apparaissent très diversifiés tant dans leur morphologie que leur faciès sédimentaire, répondant à une certaine gestion de l'eau chaude. Face à cette complexité, à laquelle s'ajoute l'évolution chronologique de l'édifice marquée par l'existence de plusieurs phases de fonctionnement successives, l'analyse géoarchéologique de ces dépôts a pu mettre en lumière un certain nombre d'éléments, en lien étroit avec l'analyse architecturale et fonctionnelle. La présence lors de la phase III des thermes d'une salle tiède (T5) à ciel ouvert s'inscrit parfaitement dans un circuit thermal complet, caractérisé par l'existence de deux salles chaude (T1 et T9) et de bassins de refroidissement (salles sud et cour des réservoirs).

La présence de ces bassins de refroidissement correspond pleinement à l'une des méthodes proposée par Sénèque (*Questions Naturelles*, III, 24) face à la gestion d'une eau chaude, à savoir la laisser stagner à l'air libre pour obtenir un certain refroidissement. La seconde méthode que Sénèque préconise est un mélange de l'eau chaude avec une eau froide, méthode qui est également mise en œuvre à Jebel Oust, dans la salle T6 où les états 3 et 4 de son fonctionnement font état d'une alimentation double en eau de la source thermique et en eau douce. Lors de cette phase, qui correspond à l'état 2 du sanctuaire lorsque celui-ci est monumentalisé, le

circuit thermal est nettement identifié, avec la présence de salles chaudes (T1 et T9), d'une grande salle tiède (T5), d'un *frigidarium* (T14) et de petits bassins individuels (T4, T6, T7, T15).

Lorsque l'édifice est annexé par la *villa*, lors de la phase IV datée du début du V^e siècle certainement suite à l'édit de Théodose, de nombreuses salles connaissent un changement de fonction et l'organisation de l'édifice est chamboulée. C'est le cas des grandes piscines qui voient le sol de leur péristyle être ennoyé par une nappe d'eau d'environ 20 cm. Cette phase, si différente soit elle des phases précédentes, n'empêche pas un entretien certain des salles thermales, comme nous avons pu le voir dans la grande salle T5 caractérisée par plusieurs phases de réfection au cours du V^e s. C'est au cours de cette phase que la salle T15, auparavant caractérisée par un bassin froid lors des phases précédentes, est alimentée par une eau tiède (eau thermique refroidie qui vient de la rotonde T9 alors ennoyée) alors que ses parois sont partiellement ruinées (plaques de calcite filonienne démantelées, Fig. B.108).



Figure B.108. Dépôt de travertins sur les dalles murales cassées de la salle T15 des thermes de Jebel Oust.

B.V.IV. D'une eau chaude captée à une eau gérée.

Les *travertins anthropiques* du site antique de Jebel Oust doivent être perçus comme le reflet de l'exploitation de la source chaude. Leur morphologie et leur faciès sont contrôlés par l'action de l'Homme. Dans la partie amont du site, **l'eau sacralisée est captée** puis canalisée et acheminée vers l'aval, sans qu'elle ne puisse subir des modifications quelconques. Seules les structures hydrauliques, représentées ici par la cavité hydrothermale et l'aqueduc, sont susceptibles d'être reconstruites et/ou entretenues régulièrement. En revanche, lorsque l'eau acheminée en aval arrive au niveau de l'édifice thermal, elle subit alors des traitements qui font d'elle **une eau entièrement gérée**. Cette gestion de l'eau chaude s'explique par la volonté de créer un circuit thermal

cohérent et se traduit par des modifications de sa température et de sa nature, à travers un refroidissement à l'air libre ou un mélange avec une eau douce.

Au sein d'un géosystème entièrement anthropisé, la mise en place de *travertins anthropiques* sur le site antique de Jebel Oust répond à une exploitation complexe de la source thermique qui débute au début de notre ère. A une eau chaude captée, pour un culte de source aux époques romaine et paléochrétienne, sont associées une eau canalisée dans l'aqueduc puis une eau efficacement gérée pour son utilisation pérenne dans l'édifice thermal en contrebas.

**PARTIE C - POUR UNE GÉOARCHÉOLOGIE DES
*TRAVERTINS ANTHROPIQUES.***

Cette partie est consacrée à élargir nos propos sur les problématiques abordées par l'analyse des travertins anthropiques en évoquant un certain nombre de sites archéologiques et les différents potentiels offerts, et en insistant sur la préservation du signal géoarchéologique. De cette manière, nous cherchons à démontrer l'intérêt d'une approche géoarchéologique à l'étude de ces dépôts dans des contextes archéologiques diachroniques et géographiquement diversifiés. Une nouvelle approche de la gestion d'une source, et plus généralement de la gestion des eaux, est proposée en abordant le facteur anthropique au sein de cette gestion, incluant la notion d'impact.

C.I. LA PRÉSERVATION DU SIGNAL GÉOARCHÉOLOGIQUE OFFERT PAR LES TRAVERTINS ANTHROPIQUES.

Nos propos concernant la préservation du signal géoarchéologique des *travertins anthropiques*, synthétisés et illustrés dans la figure C.1, prennent en compte différents paramètres englobant la puissance des dépôts sédimentaires susceptibles d'être prélevés et le degré de l'impact anthropique mise en oeuvre.

Il est évident que la condition sine qua non d'une étude géoarchéologique de *travertins anthropiques s.l.* est l'existence de ceux-ci au sein ou à proximité de structures archéologiques. L'exploitation d'une source non carbonatée offre un signal géoarchéologique absent face à cette problématique. C'est le cas par exemple de l'aqueduc gallo-romain d'Autun (Saône-et-Loire, Bourgogne), qui capte des eaux issues du massif granitique du Morvan.

La préservation du signal géoarchéologique se traduit essentiellement par deux paramètres : la nature du sédiment et la puissance des dépôts préservés au sein des structures. Un dépôt d'une simple croûte ou de quelques concrétions dans les structures offre un potentiel relativement faible pour un discours géoarchéologique cohérent, efficace et structuré. De très nombreuses structures archéologiques seront concernées par ce cas, comme l'exemple de l'aqueduc gallo-romain de Reims (Marne, Champagne-Ardenne) et des thermes antiques de Villards d'Héria (Jura, Franche-Comté), où quelques concrétions calcitiques, peu épaisses et souvent extrêmement friables, sont repérées. **Les dépôts, si rares soient-ils dans de tels exemples, ne doivent cependant pas être omis lors des études intégrées de tels éléments.**

La puissance d'un dépôt carbonaté est très souvent liée à la nature de l'eau exploitée et responsable de la précipitation du dépôt. Une eau peu carbonatée déposera très peu, à l'inverse d'une eau (sur)saturée en carbonates. La vitesse de dépôt doit également être prise en considération dans ce signal. Les tufs calcaires, issus de source froide, sont connus pour avoir une vitesse de dépôt plus faible que les travertins, issus d'eaux chaudes caractérisées par une pCO_2 souvent importante. Ainsi, les dépôts de travertins, par exemple sur les sites de *Yellowstone* (Wyoming, USA) et de *Pamukkale* (Turquie), seront majoritairement plus puissants que les dépôts

de tufs calcaires et la gestion de leurs eaux associées sera d'autant plus complexe (eau chaude, vitesses de dépôts importantes, etc.). **Ils sont susceptibles d'offrir un signal géoarchéologique précis et important, qui va de paire avec un véritable questionnement archéologique.**

C.II. UNE MÉMOIRE DE LA GESTION DE L'EAU.

Cette *géoarchéologie des travertins anthropiques* concerne la gestion de l'eau et les problématiques archéologiques, historiques et sociologiques que cette notion englobe. Pour cela, nous proposons de hiérarchiser l'exploitation des eaux, issues de sources chaudes ou froides, selon l'impact anthropique croissant sur celles-ci en parallèle d'une gestion de plus en plus complexe des eaux. Pour chacune des catégories proposées, nous établissons les structures hydrauliques susceptibles d'être associées à ces différentes gestions d'une eau.

C.II.1. Les « eaux naturelles » : l'eau utilisée.

Le terme d'« eaux naturelles » prend son sens dans l'exploitation d'une eau de source sans gestion humaine véritable. L'eau qui surgit est seulement « utilisée », et l'influence de l'Homme sur les formations de travertins *s.l.* est alors relativement faible. L'exemple du site de Rolampont (Haute-Marne, France), et son imposante tuffière, encore active de nos jours et dans laquelle des traces d'exploitation (d'âge inconnu) du tuf calcaire sont identifiées, s'inscrit pleinement dans cette catégorie. Les travertins hydrothermaux des populations Chupicuaro (Mexique) entre également dans cette catégorie, avec l'utilisation de la boue carbonatée dans le procédé culinaire de nixtamalisation, et donc une exploitation des eaux thermales qui demeure sommaire. Enfin, nous incluons dans cette classe le site de *Yellowstone* (Wyoming, Etats-Unis) et ses immenses dépôts de travertins associés aux célèbres sources chaudes, qui doivent avoir fait l'objet d'une certaine utilisation historique, bien que les données archéologiques restent faibles dans ce parc naturel protégé.

Pour ces eaux simplement utilisées, dites « eaux naturelles », la de présence de structures hydrauliques est très rare, quasi-nulle, montrant que la gestion des eaux et de leurs dépôts associés est minimaliste.

C.II.2. L'eau captée et entretenue.

La seconde catégorie de notre hiérarchie de gestion d'une eau en parallèle d'une influence croissante de l'Homme regroupe les eaux dites **captées et entretenues**. Elle rassemble les eaux issues de l'exploitation d'une source bénéficiant d'un captage, plus ou moins sophistiqué, dès l'amont. De ce captage, les eaux sont canalisées afin d'être utilisées pour l'alimentation d'une cité, d'une ville, d'un groupe de population. L'eau en elle-même n'est pas gérée, c'est-à-dire que c'est la « même eau » (c.-à-d. de même nature et de mêmes caractéristiques physico-chimiques) qui est captée, puis canalisée, et qui arrive en fin de parcours. L'Homme n'agit que sur l'entretien des structures liées au captage et au cheminement de l'eau, que ce soit sommaire-

ment (simples réfections) ou entièrement (reconstructions, partielles ou complètes). L'intention première est d'obtenir un rendement maximal de la source captée et d'utiliser de manière la plus efficace la disponibilité de la ressource.

Pour cela, l'Homme cherche à contrôler le débit de l'écoulement, directement liée au débit des sources captées, et ainsi faire face aux demandes et aux besoins désirés qui peuvent considérablement évoluer et progresser (croissance démographique d'une cité, expansion géographique d'une ville, aménagement d'édifices thermaux ou de fontaines monumentales). Toujours pour tendre vers un rendement maximal de la ressource captée, l'entretien des aménagements est nécessaire, pour ne pas dire indispensable. Au sein d'un cheminement qui peut s'avérer complexe d'amont en aval, les pertes inutiles (fuites le long du circuit), ainsi que la réduction du flux d'eau causée par l'accumulation progressive de dépôts carbonatés, doivent être évitées par le biais de réfections (curage des dépôts), de restauration (colmatage des fuites) ou de reconstruction. Les structures hydrauliques potentielles de la catégorie des eaux captées et entretenues regroupent l'ensemble des aménagements nécessaires au captage de la source (captage rudimentaire ou élaboré, captage en bois ou en pierre, etc.) et à la gestion de son débit (puits de rupture de pente, structures de dérivation), de sa nature (bassins de décantation) et de la quantité d'eau disponible (réservoirs, châteaux d'eau). Mais les principales structures qui forment l'ossature d'un tel réseau demeurent les aménagements pour canaliser et acheminer le flux d'eau : les aqueducs, les canaux et les conduites.

Un certains nombres de sites archéologiques et leurs dépôts de travertins *s.l.* associés s'inscrivent dans cette catégorie. C'est le cas d'aménagements typiques de l'ingénierie hydraulique romaine représentée par les aqueducs, captant des eaux froides carbonatées, et dont certains sont situés en Gaule romaine (aqueducs de Nîmes, Fréjus, Poitiers, Reims), ou dispersés dans l'espace géographique de l'Empire : aqueduc de Cologne (Allemagne), aqueduc d'Argos (Argolide, Grèce), aqueduc de Carthage (Tunisie). Associés à ces aqueducs dans le cheminement hydraulique, les châteaux d'eau et les fontaines peuvent également voir leur structure interne être recouverte de dépôts carbonatés, par exemple les *castella* d'Ostie (Latium, Italie) et de Pompéi (Campanie, Italie) et la fontaine antique de Cimiez (Alpes-Maritimes). Au même titre, un exemple parfait d'eau captée puis canalisée, et de structures associées entretenues (curage des dépôts formés progressivement dans les canaux) réside en ces canaux agricoles (*tecoatl*) aménagés par les populations pré-aztèques dans la vallée de Tehuacán, au Mexique.

C.II.3. L'eau gérée.

C'est la catégorie pour laquelle l'impact anthropique est le plus important puisqu'elle comprend l'ensemble des eaux bénéficiant d'une gestion certaine, simple ou complexe, dès la source exploitée. Les eaux sont captées, canalisées puis subissent des modifications artificielles qui provoquent un changement de leur nature. Cette gestion répond à une volonté d'obtenir une eau contrainte pour des pratiques et des besoins, essentiellement balnéaires. A une nécessité de répartition des eaux au sein des édifices thermaux, par le biais de conduites et de tuyaux, s'ajoute une nécessité de contrôle de leur température pour les besoins des différents bains.

Deux situations se présentent alors, suivant l'exploitation d'une source froide ou d'une source chaude. Dans le premier cas, que nous qualifions de gestion simple, il s'agit de chauffer l'eau, par l'intermédiaire d'un système de chauffage plus ou moins sophistiqué (simple foyer, le *praeformium* des Romains et le système de chauffage par hypocauste), à une température voulue et nécessaire à la pratique du bain chaud, et plus généralement à la mise en place d'un véritable circuit thermal. Les exemples des thermes gallo-romains de *Vertillum* (Côte d'Or) et des bains privés de la villa de Jonvelle (Haute-Saône), caractérisés par l'exploitation d'une source froide karstique s'inscrivent pleinement dans ce mode de gestion.

A Jonvelle, l'impact anthropique sur le développement des tufs calcaires est d'autant plus accentué du fait de la présence d'une structure spécifique dont le rôle supposé est de provoquer la précipitation des carbonates en amont des piscines. L'exploitation d'une source froide et carbonatée et sa gestion associée se retrouvent également sur le site de Delphes (Grèce), avec la présence de bains hellénistiques puis de thermes romains alimentés par l'eau d'une source surgissant sur le versant calcaire. Une telle gestion se retrouve dans la cité grecque de *Poseidonia* (plus tard la cité romaine de *Paestum*) située en contexte carbonaté et dont les eaux de source engendrent de puissants dépôts de tufs calcaires. Ceux-ci ont été utilisés comme matériau pour la construction de la ville puis l'eau carbonatée fut entièrement gérée et contrôlée au sein des structures hydrauliques présentes (fontaine, citernes, thermes).

Sur le site de Villars d'Héria (Jura), c'est l'ensemble du géosystème qui est contrôlé pour le captage de la source sacrée et l'utilisation de son eau carbonatée pour l'alimentation d'un édifice thermal à proximité.

L'exploitation d'une source chaude implique une gestion plus complexe justifiée par l'intervention de techniques nécessaires au refroidissement d'une eau originellement trop chaude pour alimenter le circuit thermal. C'est le cas dans les thermes antiques de Jebel Oust, où **les deux méthodes proposées par Sénèque** (*Questions Naturelles*, III, 24) sont mises en œuvre pour refroidir l'eau chaude et obtenir la température désirée. L'une consiste à mélanger l'eau chaude avec une eau plus froide, comme c'est le cas pour la salle T6 des thermes de Jebel Oust, alimentées simultanément par l'eau chaude de la source thermale dans laquelle est injectée une eau douce et tempérée. La seconde voit l'installation de grands bassins servant de réservoirs de refroidissement à l'air libre de l'eau chaude avant son injection dans les bassins thermaux. Ce traitement de l'eau chaude est réalisé uniquement dans la partie aval du site, lorsque l'eau arrive au niveau de l'édifice thermal. En amont, depuis la source jusqu'aux thermes, l'eau de la source chaude est captée puis simplement canalisée, et rendue inaccessible, ne subissant aucun traitement.

Une gestion similaire d'une eau chaude employant les deux méthodes de Sénèque mises en œuvre à Jebel Oust est certainement employée dans les thermes romains des sites tunisiens de Hammam Mellègue et Hammam Biadha, sur le site de Hammam Meskoutine (Algérie), ainsi que dans la cité antique de *Hiérapolis* (Turquie), qui exploitent également une eau thermale.

Dans cette catégorie de gestion simple ou complexe, l'eau en elle-même est gérée, c'est-à-dire qu'en plus d'être captée, canalisée et judicieusement répartie, elle subit des modifications significatives de sa nature (mélange avec une eau de nature différente) et de sa température (chauffage ou refroidissement). **L'ensemble de ces modifications provoque une grande diversité des dépôts dont les signatures pétrographique, minéralogique et géochimique seront entièrement contrôlées par les facteurs anthropiques.**

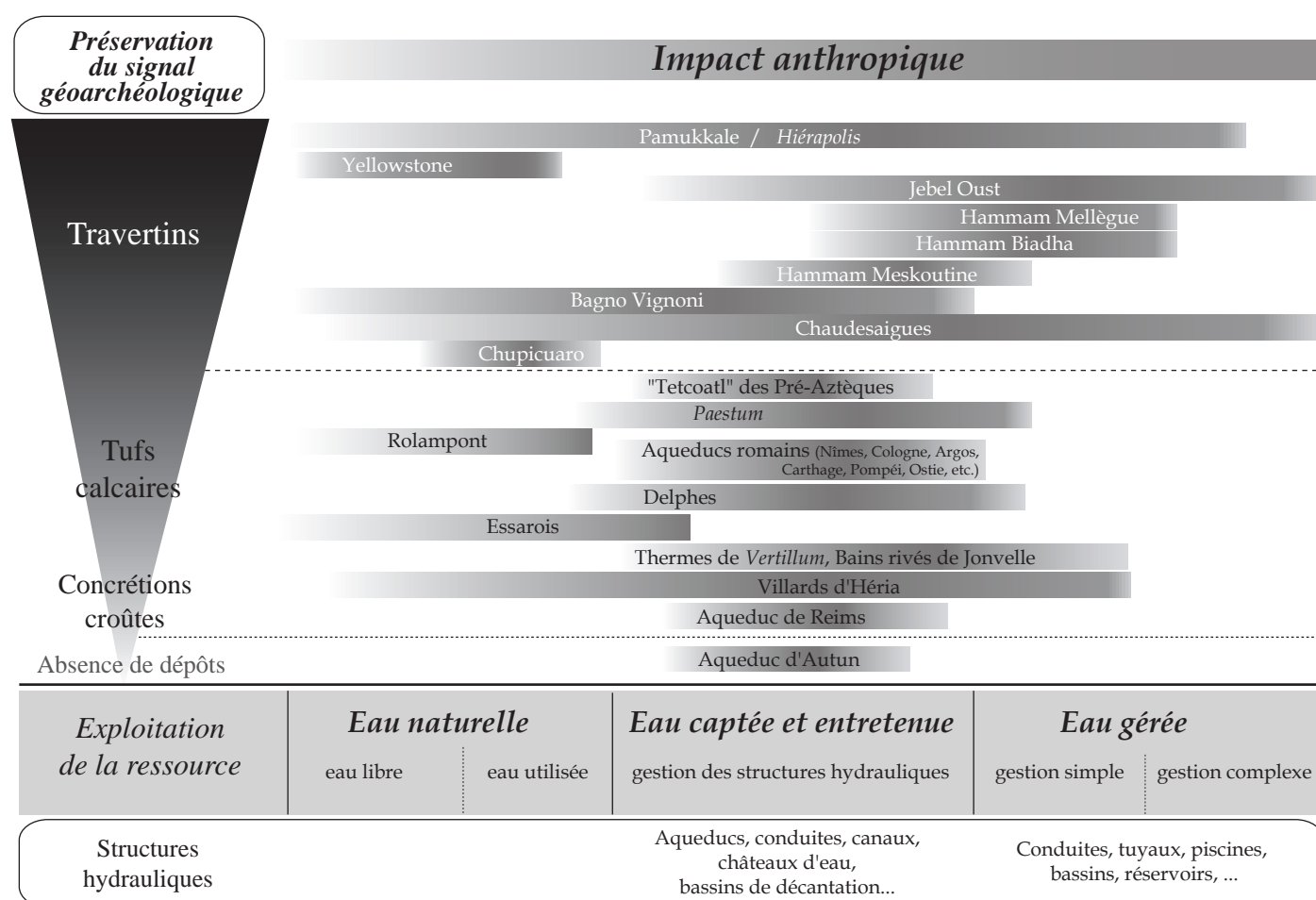


Figure C.1. Synthèse du potentiel de sites archéologiques en fonction de la préservation du signal géoarchéologique et du degré d'impact anthropique (voir les détails dans le texte).

C.III. POURQUOI UNE GÉOARCHÉOLOGIE DES *TRAVERTINS ANTHROPIQUES* ?

C.III.1. Une mémoire de la fonction des structures hydrauliques.

En parallèle de la mise en lumière de la gestion complexe d'une source thermique, l'étude géoarchéologique des *travertins anthropiques* préservés dans les structures archéologiques du site de Jebel Oust a permis de mettre en évidence un certain nombre d'éléments concernant la nature et la fonction des structures hydrauliques. En amont, les *travertins anthropiques* sont les témoins de captages différents de la source thermique, en liaison avec les exploitations différentes de la source entre le début de notre ère et son tarissement à la fin de l'Antiquité. Depuis la source, l'acheminement de l'eau thermique se fait par le biais d'un profond aqueduc dont le colmatage par des travertins au faciès en *puff-pastry* rend compte d'un écoulement peu turbulent, traduit par une pente très faible entre le captage et les structures thermales en contrebas.

En aval sur le versant, la diversité des dépôts de *travertins anthropiques* dans les thermes antiques rend compte d'une complexité chronologique et fonctionnelle de l'édifice. Les caractéristiques sédimentologiques (pétrographiques et géochimiques) des différents travertins traduit la différenciation des différentes structures dans lesquelles ils se déposent, à savoir des salles thermales couvertes, des salles tièdes ouvertes, des bassins à ciel ouvert, des petits bassins thermaux et des canalisations. Leur étude permet également de mettre en évidence des phases de fonctionnement des thermes, des phases d'abandon de certaines salles, et des phases de réfection.

C.III.2. Une approche de la température des eaux.

La signature pétrographique (présence d'aragonite dans la structure de certains dépôts) et géochimique (isotopes de l'oxygène) des *travertins anthropiques* permet de caractériser la température de l'eau à laquelle ils se sont déposés. Ce point est particulièrement intéressant puisque, si la température des sources captées est souvent connue ou approchée (54 °C pour la source actuelle de Jebel Oust) et considérée identique à l'Antiquité, elle est rarement appréciée au sein d'une gestion complexe qui caractérise les édifices thermaux. Dans les thermes de Jebel Oust, nous avons mis en évidence des différences de température de quelques degrés entre différentes salles thermales dont la fonction est différente (piscine chaudes et tièdes, réservoirs de refroidissement) et de proposer une estimation des valeurs de température de certaines eaux. Ainsi se dessinent les différences de température entre bain chaud (29 °C), bain tiède (23 °C), et bassins froids (19 °C).

C.III.3. Une nouvelle approche des problématiques liées à l'eau.

L'étude géoarchéologique des *travertins anthropiques* s'inscrit pleinement dans les problématiques archéologiques liées à l'eau. Celles-ci, fort nombreuses, ont souvent fait leur preuve en abordant le sujet à travers

une approche environnementale (ou naturaliste), par l'étude de la disponibilité de la ressource que ce soit à l'échelle d'un site ou à une échelle régionale, et le rendement autorisé et obtenu. D'autres études concernent plus précisément les structures hydrauliques mises en jeu, les techniques employées et les monuments consacrés à l'eau, à travers l'analyse de l'ingénierie hydraulique et l'évolution de celle-ci au sein des civilisations historiques, en particulier chez les Romains.

La notion de *travertins anthropiques* permet une double approche des problématiques liées à l'eau. D'une part, elle aborde la **relation entre l'Homme et son environnement** par une caractérisation de l'emprise humaine et du contrôle plus ou moins complexe d'une source carbonatée, froide ou chaude, et des dépôts associés, tufs calcaires et travertins. **Une caractérisation croissante de l'impact anthropique** sur les dépôts de travertins *s.l.*, et sur la source exploitée associée, est proposée. D'autre part, **les *travertins anthropiques* se révèlent être de puissantes archives sédimentaires de la nature et de la fonction des structures hydrauliques mises en œuvre dans l'exploitation des eaux.** Une approche géoarchéologique cohérente se doit d'intégrer l'étude de ces dépôts permettant d'appréhender la question de la gestion d'une source, par le biais d'un nouveau modèle proposé prenant en compte l'impact humain en parallèle de la gestion justifiée d'une source (Fig. C.2).

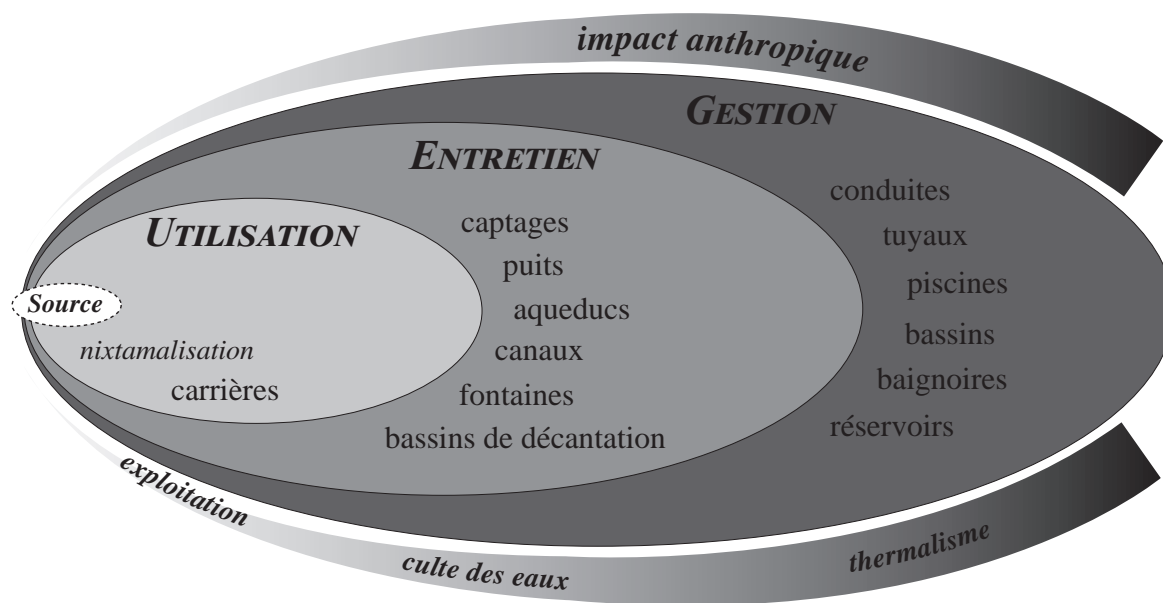


Figure C.2. Modélisation de la gestion d'une source à travers l'analyse des travertins anthropiques *s.l.*

CONCLUSION.

Les travertins anthropiques, un modèle de gestion.

La définition de la notion de *travertins anthropiques* répond à une volonté de prendre en compte un certain nombre de paramètres concernant le développement de ces formations sédimentaires continentales et leurs caractéristiques. Les écrits des auteurs antiques témoignent d'une parfaite connaissance du phénomène à l'origine de cette roche et de la grande exploitation du *Lapis tiburtinus*, notamment dans la construction et l'architecture antique. Véritables archives sédimentaires des conditions environnementales de leur dépôt, les travertins ont prouvé leur grand intérêt au sein de problématiques environnementales. Dans une perspective géoarchéologique, la prise en compte de l'impact anthropique sur ces formations est indispensable, constituant la clef de voûte de cette notion de *travertins anthropiques*, dépôts dont les caractéristiques sont principalement contrôlés par des facteurs humains.

La prise en compte de ces dépôts sédimentaires en contexte archéologique autorise une nouvelle approche des problématiques liées à l'eau. Les travertins représentent une véritable « **mémoire de l'eau** », entendons par là que leur étude permet la mise en évidence d'informations concernant les conditions de dépôt et les variations hydrologiques des sources et des eaux qui leur sont associées. Nous accentuerons ce propos, en parlant préférentiellement de « **mémoire de la gestion d'une eau** », comme nous avons pu le démontrer sur le site antique de Jebel Oust, en Tunisie.

L'approche géoarchéologique réalisée sur ce site a permis de mettre en lumière une complexité dans **la gestion d'une source chaude**, exploitée depuis le début de notre ère jusqu'à son tarissement à la fin de l'Antiquité tardive. Les variations hydrologiques saisonnières de cette source chaude (saison humide et saison sèche), et surtout leur prise en considération par les ingénieurs romains, ont été reconnues. Les conditions du captage de la source rendent compte d'un culte des eaux à l'époque romaine, avec **une eau chaude captée** rendue inaccessible, et qui se poursuit à l'époque paléochrétienne par une ouverture de l'évent thermal. L'eau captée est ensuite simplement **canalisée**, par le biais d'un profond aqueduc lors de la seconde phase du sanctuaire datée du II^e s. apr. J.-C., pour être acheminée vers un complexe thermal situé en contrebas. C'est à ce moment que l'eau chaude devient entièrement **gérée**, traduit par un impact anthropique croissant sur le développement des travertins. La gestion de l'eau chaude dans les thermes a pu être précisée à travers la caractérisation de la nature et la fonction des salles thermales, la mise en pratique des méthodes proposées par Sénèque (refroidissement de l'eau chaude à l'air libre ou mélange avec une eau froide), et la mise en évidence de réfections et de phases de dysfonctionnement, en particulier lorsque les thermes sont annexés par la *villa*.

Le cheminement **d'une eau sacrée à une eau gérée** s'inscrit dans **un modèle** que nous proposons concernant la gestion d'une source, assimilant le degré d'impact anthropique en parallèle des composantes historiques, sociologiques, archéologiques et technologiques que comprend l'exploitation d'une eau (utilisation, entretien, gestion). Ce modèle intègre l'ensemble des structures hydrauliques susceptibles d'être employées pour l'exploitation, et la gestion, d'une eau.

La mise en œuvre de notre démarche géoarchéologique doit être poursuivie et appliquée à des sites affichant un potentiel similaire, tels que les sites de *Pamukkale* (Turquie) et *Paestum* (Italie), ou encore les sites thermaux de *Hammam Mellègue* et *Hammam Biadha* (Tunisie). En parallèle de l'expansion géographique de notre approche, l'étude des travertins anthropiques doit prendre en compte les progrès des méthodes analytiques, en insistant sur les techniques permettant une analyse de la composition géochimique à haute résolution (par exemple les analyses PIXE) et qui commencent à faire leurs preuves sur les carbonates archéologiques (cette étude ; Bobée *et al.*, 2010 ; Sürmelihindi *et al.*, 2013).

D'une manière générale, ce n'est qu'au sein d'équipes et de programmes de recherche pluri-disciplinaires que la géoarchéologie des travertins anthropiques peut, et doit, se développer.

BIBLIOGRAPHIE.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

- Adolphe, J.-P. (1973) – *Contribution à l'étude des encroûtements carbonatés de l'aqueduc du Pont du Gard*. Académie des Sciences de Paris, 277, 2329-2332.
- Adolphe, J.-P. (1981) – *Observations et expérimentations géomicrobiologiques et physicochimiques des concrétionnements carbonatés continentaux actuels et fossiles*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), 339 p.
- Amato, V., Anzalone, E., Aucelli, P.P.C., D'Argenio, B., Ferreri, V., Roskopf, C.M. (2012) – *Sedimentology and depositional history of the travertines outcropping in the Poseidonia-Paestum archaeological area*. Rendiconti Lincei, 23(1), 61-68.
- Andreo, B., Martin-Martin, M., Martin-Algarra, A. (1999) – *Hydrochemistry of spring water with travertines. Example of the Sierra de la Alfaguara (Granada, southern Spain)*. Comptes-rendus de l'Académie des Sciences, Paris. Earth and Planetary Sciences, 328, 745-750.
- Andrews, J.E. (2006) – *Palaeoclimatic records from stable isotopes in riverine tufas: Synthesis and review*. Earth-Science Reviews, 75, 85-104.
- Andrews, J.E., Pedley, H.M., Dennis, P.F. (1994) – *Stable isotope record of paleoclimate change in a British Holocene tufa*. Holocene, 4, 349-355.
- Antoine, P., Limondin-Lozouet, N., Auguste, P., Loch, J.-L., Galheb, B., Reyss, J.-L., Escudé, É., Falguères, C., Voinchet, P. (2006) – *Le tuf de Caours (Somme, France) : mise en évidence d'une séquence Éemienne et d'un site paléolithique associé*. Quaternaire, 17(4), 281-320.
- Anzalone, E., Ferreri, V., Sprovieri, M., D'Argenio, B. (2007) – *Travertines as hydrological archives: The case of the Pontecagnano deposits (southern Italy)*. Advances in Water Resources, 30, 2159-2175.
- Arenas, C., Gutiérrez, F., Osácar, C., Sancho, C. (2000) – *Sedimentology and geochemistry of fluvio-lacustrine tufa deposits controlled by evaporite solution subsidence in the central Ebro Depression, NE Spain*. Sedimentology, 47, 883-909.
- Arp, G., Wedemeyer, N., Reitner, J. (2001) – *Fluvial tufa formation in a hard-water creek (Deinschwanger Bach, Franconian Alb, Germany)*. Facies, 44, 1-22.
- Baker, A., Smith, C.L., Jex, C., Fairchild, I.J., Genty, D., Fuller, L. (2008) – *Annually laminated Speleothems: a Review*. International Journal of Speleology, 37(3), 193-206.
- Baron, J.-C., Bonvalot, N. (2001) – *Jonvelle : les bains d'une villa gallo-romaine en bord de Saône*. DRAC Franche-Comté, Éditions du Patrimoine, Coll. Itinéraire, 32 p.
- Ben Abed, A., Scheid, J. (2003) – *Sanctuaire des eaux, sanctuaire de sources, une catégorie ambiguë : l'exemple de Jebel Oust (Tunisie)*. In Sanctuaires et sources dans l'Antiquité - les sources documentaires et leurs limites dans la description des lieux de culte, Coll. Centre Jean Bérard, Napoli, 22, 7-14.
- Ben Abed, A., Scheid, J. (2005) – *Nouvelles recherches archéologiques à Jebel Oust (Tunisie)*. Comptes-rendus des séances de l'année 2005. Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, Éditions De Boccard, 321-349.

- Ben Hassen, H., Maurin, L. (1998) – *Oudhna (Uthina) : La redécouverte d'une ville antique de Tunisie*. Éditions Ausonius, Coll. Mémoires, Bordeaux, 251 p.
- Bénard, J., Méniel, M., Petit, C. (2010) – *Gaulois et Gallo-romains à Vertillum, 160 ans de découvertes archéologiques*. Éditions Infolio, Archeodunum, Collection Vestigia, 173 p.
- Benoit, F. (1977) – *Cimiez : la ville antique : monuments, histoire*. Éditions De Boccard, Paris, XXI, 164 p.-32 pl.
- Berthon, L. (1914) – *L'Institut de Carthage à Oudena & au Djebel-Oust*. Revue Tunisienne, 105, 247-263.
- Blanc, J.-J. (2000) – *La séquence des lamines carbonatées de la tranchée du chemin de fer au grès Sernhac*. In L'aqueduc de Nîmes et le Pont du Gard - Archéologie, géosystème, histoire, 2^{ème} édition, Éditions CNRS, 23-30.
- Bobée, C., Huon, S., Guendon, J.-L., Salomon, J., Gébara, C., Michel, J.-M., Regert, M. (2010) – *High-resolution (PIXE) analyses of carbonate deposits in a roman aqueduct (Fréjus, SE France): palaeohydrological variability and water resources management in southern Gaul during the Roman period*. Archaeometry, 53, 241-260.
- Bonnin, J. (1986) – *L'eau dans l'Antiquité : l'hydraulique avant notre ère*. Éditions Eyrolles, 450 p.
- Bouet, A. (2003) – *Les thermes privés et publics en Gaule Narbonnaise*. 2 vol., Coll. École Française de Rome, 320, EFR, Rome, 416 + 381 p.
- Bourgeois, C. (1992) – *Divona II. Monuments et sanctuaires du culte gallo-romain de l'eau*. Éditions De Boccard, Paris, 313 p.
- Bourgou, M., Oueslati, A. (1987) – *Les dépôts historiques de la vallée du Kébir-Miliane (Nord-Est de la Tunisie)*. Méditerranée, 1, p. 43-49.
- Brödner, E. (1983) – *Die römischen Thermen und das antike Badewesen : eine kulturehistorische Betrachtung*. Darmstadt, 306 p.
- Broise, H. (1994) – *Les pratiques du bain chaud par immersion en Sicile et dans la péninsule italienne à l'époque hellénistique*. Xenia Antiqua, 3, 79-85.
- Broise, H. (2003) – *À propos des thermes d'Hammat Gader*. Syria, 80, 217-236.
- Broise, H. (2009) – *Entre continuité et ruptures, L'introduction des pratiques balnéaires grecques et romaines en Égypte*. In Le Bain collectif en Égypte. Institut Français d'Archéologie Orientale, Études urbaines, 7, Le Caire, 9-15.
- Broise, H., Curie, J. (2009) – *L'étude de travertins carbonatés du sanctuaire de Jebel Oust (Tunisie) : une contribution à l'analyse diachronique, fonctionnelle et architectural des thermes*. Actes du colloque Balnéorient « βαλανεῖα, thermes et hammams, 25 siècles de bain collectif » (Damas, 6-9 novembre 2009), sous presse.
- Brun, A. (1992) – *Pollens dans les séries marines du Golfe de Garbè et du plateau des Kerkennah (Tunisie) : signaux climatiques et anthropiques*. Quaternaire, 3, 31-39.
- Caley, E.R., Richards, J.F.C. (1956) – *Theophrastus on Stones. Introduction, Greek texte, English translation and Commentary*. The Ohio State University, Columbus, Ohio, 238 p.

- Calligaro, T., Dran, J.-C., Poirot, J.-C., Querré, G., Salomon, S., Zwann, J.C. (2000) – PIXE/PIGE characterization of emeralds using an external micro-beam. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B161(3), 769-774.
- Calligaro, T., Dran, J.-C., Salomon, J., Walter, P. (2004) – *Review of accelerator gadgets for art and archaeology*. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B226, 29-37.
- Campy, M., Macaire, J.-L. (1989) – *Géologie des formations superficielles - Géodynamique, faciès, utilisation*. Éditions Masson, 433 p.
- Campy, M., Macaire, J.-J. (2003) – *Géologie de la surface : Érosion, transfert et stockage dans les environnements continentaux*. 2^{ème} édition, Éditions Dunod, 442 p.
- Capezzuoli, E., Gandin, A. (2004) – *I “travertini” in Italia: proposta di una nuova nomenclatura basata sui caratteri genetici*. *Il Quaternario, Italian Journal Of Quaternary Sciences*, 17 (2/1), 273-284.
- Capezzuoli, E., Gandin, A., Sandrelli F. (2008) – *Evidence of associated deposition of travertine and calcareous tufa in the Quaternary carbonates of Valdelsa Basin (Tuscany)*. *Il Quaternario, Italian Journal of Quaternary Sciences*, 21(1B), 113-124.
- Caran, S.C., Neely, J.A., Winsborough, B.M., Sorensen, F.R., Valastro, Jr, S. (1996) – *A Late Paleo-Indian/Early Archaic Water Well in Mexico - Possible Oldest Water - Management Feature in the New World*. *Geoaarchaeology*, 11(1), 1-35.
- Carlut, J., Chazot, G., Dessales, H., Letellier, E. (2009) – *Trace element variations in an archaeological carbonate deposit from the antique city of Ostia : Environmental and archaeological implications*. *C. R. Geoscience* 341, *Geochemistry (Isotopic Geochemistry)*, 10-20.
- Carthew, K.D., Drysdale, R.N. (2003) – *Late Holocene fluvial change in a tufa-depositing stream: Davys Creek, New South Wales, Australia*. *Australian Geographer*, 34, 123-139.
- Carton (1907) – D^r Carton, *Bulletin de la société archéologique de Sousse*, 22-23.
- Casanova, J. (1981) – *Étude d'un milieu stromatolitique continental, Les travertins Plio-Pléistocènes du Var (France)*. Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille III, 132 p.
- Casanova, J. (1986) – *East African Rift stromatolites*. In *Sedimentation in the African Rifts*, Geological Society of London Special Publication, London (Geological Society), 25, 201-210.
- Celle-Jeanton, H., Zouari, K., Travi, Y., Daoud, A. (2001) – *Caractérisation isotopique des pluies en Tunisie. Essai de typologie dans la région de Sfax*. *Compte-rendus de l'Académie des Sciences de Paris, série IIa* 33, 625-631.
- Chafetz, H.S., Folk, R.L. (1984) – *Travertines: Depositional morphology and the bacterially-constructed constituents*. *Journal Sedimentary Petrology*, 54, p.289-316.
- Chafetz, H.S., Rush, P.F., Utech, N.M. (1991) – *Microenvironmental controls on mineralogy and habit of CaCO₃ precipitates: an example from an active travertine system*. *Sedimentology*, 38, 107-126.
- Chafetz, H. S., Lawrence, J. R. (1994) – *Stable Isotopic Variability within Modern Travertines*. *Géographie physique et Quaternaire*, 48/3, 257-273.

- Chafetz, H. S., Guidry, S. A. (1999) – *Bacterial shrubs, crystal shrubs, and ray-crystal shrubs: bacterial vs. abiotic precipitation*. *Sedimentary Geology*, 126, 57-74.
- Clark, I., Fritz, P. (1997) – *Environmental isotopes in hydrogeology*. Lewis publishers, Boca Raton, 328 p.
- Couchoud, I. (2008) – *Les spéléothèmes, archives des variations paléoenvironnementales*. *Quaternaire*, 19/4, 255-274.
- Couteaux, M. (1969) – *Formation et chronologie palynologique des tufs calcaires du Luxembourg belgo-grand-ducal*. *Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, 6, 179-206.
- Craig, H. (1957) – *Isotopic standards for carbon and oxygen correction factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 12 (1-2), 133-149.
- Craig, H. (1961a) – *Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters*. *Science*, 133, 1833-1834.
- Craig, H. (1961b) – *Isotopic variations in meteoric waters*. *Science*, 133, 1702-1703.
- Curie, J., Petit, C., Ben Abed, A., Scheid, J. (2011) – *Étude géoarchéologique d'un lieu de culte implanté sur une source thermale : le sanctuaire de Jebe Oust (Tunisie)*. *Actes du colloque Agglomérations et sanctuaire, Réflexions à partir de l'exemple de Grand, Domrémy-La-Pucelle (Vosges)*, soumis.
- Dabkowski, J., Limondin-Lozouet, N., Antoine, P., Marca-Bell, A., Robert, V., Andrews, J. (2011) – *Enregistrement des variations climatiques au cours des interglaciaires d'après l'étude des isotopes stables de la calcite de tufs calcaires pléistocènes du nord de la France : exemple des séquences de Caours (SIM 5e; Somme) et de La Celle-Sur-Seine (SIM 11; Seine-et-Marne)*. *Quaternaire*, 22(4), 275-283.
- Dabkowski, J., Limondin-Lozouet, Antoine, P., N., Andrews, J., Marca-Bell, A., Robert, V. (2012) – *Climatic variations in MIS recorded by stable isotopes and trace elements in a French tufa (La Celle, Seine valley)*. *Journal of Quaternary Science*, 27(8), 790-799.
- Dansgaard, W. (1964) – *Stable isotopes in precipitation*. *Tellus*, 16, 436-468.
- De Cazenove, O., Scheid, J. (2003) – *Aux sources d'un colloque*. In *Sanctuaires et sources dans l'Antiquité - les sources documentaires et leurs limites dans la description des lieux de culte*, coll. Centre Jean Bérard, Napoli, 22, 1-6.
- Dobosi, V.T. (2003) – *Archaeological finds in NE-Transdanubian travertine*. *Acta Geologica Hungarica*, 46(2), 205-214.
- Dubar, M. (2006a) – *Approche climatique de la période romaine dans l'est du Var : recherche et analyses des composantes périodiques sur un concrétionnement centennal (Ier-IIe siècle apr.J.-C.) de l'aqueduc de Fréjus*. *ArchéoS-ciences, revue d'archéométrie*, 30, 163-171.
- Dubar, M. (2006b) – *Recherche et interprétation climatique des microcycles du concrétionnement travertineux de l'aqueduc romain de Fréjus (Var, France)*. *Quaternaire*, 17 (2), 79-85.
- Egea, A., Arias, L., Matilla, G., Gallardo, J. (2003) – *El santuario romano de las aguas de Fortuna (Murcia)*. *Bolskan*, 20, 131-140.
- Ehlen, J., Haneberg, W.C., Larson, R.A. (2005) – *Humans as Geologic Agents*. Geological Society of America. *Reviews in Engineering Geology*, Boulder, Colorado, 16, 158 p.

- Emery, B. (1961) – *Archaic Egypt*. Penguin, England, 269 p.
- Fabre, G. (1986) – *Tufs et travertins du Languedoc méditerranéen et des Causses majeurs*. Méditerranée, 57, 66-70.
- Fabre, G., Fiches, J.-L. (1986) – *Les concrétionnements de l'aqueduc romain de Nîmes*. Méditerranée, 57, 129-130.
- Fabre, G., Fiches, J.-L., Paillet, J.-L. (2000) – *Fiche d'identité de l'aqueduc*. In L'aqueduc de Nîmes et le Pont du Gard - Archéologie, géosystème, histoire, 2^{ème} édition, Éditions CNRS, 23-30.
- Fagan, G.G. (1999) – *Bathing in Public in the Roman world*. Ann Arbor, University of Michigan Press, 437 p.
- Faust D., Zielhofer C., Escudero R.B., Diaz del Olmo F. (2004) – *High-resolution fluvial record of late Holocene geomorphic change in northern Tunisia: climatic or human impact?* Quaternary Science Reviews, 23, 1757-1775.
- Fendri, M. (1965) – *Évolution chronologique et stylistique d'un ensemble de mosaïques dans une station thermale à Djebel Oust (Tunisie)*. In La mosaïque gréco-romaine, Paris, 157-173.
- Fénelon, P. (1968) – *Vocabulaire français des phénomènes karstiques*. Mémoires et documents du CNRS, Paris, Phénomènes karstiques, 1(4), 13-68.
- Fernández, R.G., Séiquer, G.M., Matallana, F.F. (1996) – *La recuperación arqueológica del balneario romano de Fortuna*. Antig. Crist., Murcia, 13, 179-220.
- Flügel, E. (2010) – *Microfacies of carbonate rocks - Analysis, Interpretation and Application*. 2nd edition, Springer, XXIII, 984 p.
- Ford, T.D., Pedley, H.M. (1992) – *Tufa deposits of the world*. Journal of the Speleological Society of Japan, 17, 46-63.
- Folk, R.L. (1994) – *Interaction between bacteria, nannobacteria, and mineral precipitation in hot springs of Central Italy*. Géographie physique du Quaternaire, 48/3, 233-246.
- Fouache, É. (2006) – *10000 ans d'évolution des paysages en Adriatique et en Méditerranée Orientale*. Géomorphologie, Paléoenvironnements, Histoire, Éditions De Boccard, Travaux de la Maison de l'Orient et de la Méditerranée, 45, 223 p.
- Fouache, É., Rasse, M. (2007) – *Géoarchéologie*. Avant-propos, Bulletin de l'Association des Géographes Français, 1, 115-118.
- Foucault, A., Raoult, J.-F. (1985) – *Dictionnaire de géologie*. Éditions Masson.
- Fouke, B.W., Farmer, J.D., Des Marais, D.J., Pratt, L., Sturchio, N.C., Burns, P.C., Discipulo, M.K. (2000) – *Depositional facies and aqueous-solid geochemistry of travertine-depositing hot springs (Angel Terrace, Mammoth hot springs, Yellowstone National Park, U.S.A)*. Journal of Sedimentary Research, 70, 3, 565-585.
- Freytet, P. (1998) – *Contribution à l'étude des tufs du Bassin de Paris : typologie des édifices tuffacés (stromatolitiques) des chenaux fluviaux*. Bulletin du Centre de Géomorphologie de Caen, 38, 9-27.
- Freytet, P., Verrecchia, E.P. (1998) – *Freshwater organisms that build stromatolites: a synopsis of biocrystallization by prokaryotic and eukaryotic algae*. Sedimentology, 45, 535-563.

- Friedman, I. (1970) – *Some investigations of the deposition of travertine from hot springs - I. The isotopic chemistry of a travertine-depositing spring*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 34, 1303-1315.
- Friedrich, W.L. (2000) – *Fire in the sea. The Santorini volcano: natural history and the legend of Atlantis*. Cambridge University Press, Cambridge, 258 p.
- Friedrich, W.L., Kromer, B., Friedrich, M., Heinemeier, J., Pfeiffer, T., Talamo, S. (2006) – *Santorini Eruption Radio-carbon Dated to 1627-1600 B.C*. *Science*, 312/5773, 548.
- Gandin, A., Capezzuoli, E., Ciacci, A. (2006) – *The stone of the inscribed Etruscan stelae from the Valdelsa area (Siena, Italy)*. *Geological London Society, Special Publications*, 257, 273-282.
- Gandin, A., Capezzuoli, E. (2008) – *Travertine versus calcareous tufa: distinctive petrologic features and stable isotopes signatures*. *Il Quaternario, Italian Journal of Quaternary Sciences*, 21(1B), 25-136.
- Gentelle, P. (2003) – *Traces d'eau : un géographe chez les archéologues*. Éditions Belin, Paris, 239 p.
- Gerster, B. (1884) – *L'Isthme de Corinthe : tentatives de percement dans l'Antiquité*. *Bulletin de correspondance hellénique*, 8, 225-232.
- Ghilardi, M., Fouache, É., Chiverrell, R. (2009) – *Introduction to special issue on Geoarchaeology: human-environment connectivity*. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 4, 227-228.
- Ginouvès, R. (1992) – *Dieux guérisseurs et sanctuaires de sources dans la Grèce antique*. In *Dieux guérisseurs en Gaule romaine*, Éditions Chr. landes, Lattes, 97-105.
- Glover, C., Robertson, A. H. F. (2003) – *Origin of tufa (cool-water carbonate) and related terraces in the Antalya area, SW Turkey*. *Geological Journal*, 38, 329-358.
- Gonfiantini, R., Panichi, C., Tongiorgi, E. (1968) – *Isotopic disequilibrium in travertine deposition*. *Earth and Planetary Science Letters*, 5, 55-58.
- Goudie, A.S., Viles, H.A., Pentecost, A. – *The late-Holocene tufa decline in Europe*. *The Holocene*, 3, 181-186.
- Grandieux, A. (2005) – *Identification d'une fontaine antique au sud des thermes de l'est de Cimiez (Cemenelum) à Nice (06)*. *Institut de Préhistoire et d'Archéologie Alpes Méditerranée, Mémoires*, XLVII, 115-125.
- Grenier, A. (1960) – *Manuel d'archéologie gallo-romaine, t.IV, Les monuments des eaux. Aqueducs, thermes, villes d'eau et sanctuaires de l'eau*. Paris, 983 p.
- Grimal, P. (2004) – *Voyage à Rome*. Éditions Robert Laffont, coll. Bouquins, Paris.
- Gsell, S. (1911) – *Le climat de l'Afrique du Nord dans l'Antiquité*. *Revue africaine*, LV, 343-410.
- Gsell, S. (1913) – *Histoire Ancienne de l'Afrique du Nord, t.1, Les conditions du développement historique, les temps primitifs, la colonisation phénicienne et l'Empire de Carthage*. Paris, 544 p.
- Gsell, S., Graillot, H. (1893) – *Explorations archéologiques dans le département de Constantine (Algérie)*. *MEFRA*, 13, 507-517.

- Guendon, J.-L., Vaudour J. (2000) – *Concrétions de l'aqueduc de Nîmes, Observations et hypothèses*. Méditerranée, 1-2, 140-151.
- Guendon, J.-L., Leveau P. (2005) – *Dépôts carbonatés et fonctionnement des aqueducs romains : Le bassin amont du vallon des Arcs sur l'aqueduc d'Arles (Bouches-du-Rhône)*. Gallia, 62, 87-96.
- Guo L., Riding R., (1992) – *Aragonite laminae in hot water travertine crusts, Rapoleno Terme, central Italy*. Sedimentology, 39, 1067-1079.
- Guo, L., Andrews, J.E., Riding, R., Dennis, P., Dresser, Q. (1996) – *Possible microbial effects on carbon stable isotopes in hot spring travertines*. Journal of Sedimentary Research, 66(3), 468-473.
- Guo, L., Riding, R. (1998) – *Hot-spring travertine facies and sequences, Late Pleistocene, Rapolano Terme, Italy*. Sedimentology, 45, 163-180.
- Guo L., Riding R., (1999) – *Rapid facies changes in Holocene fissure ridge hot spring travertines, Rapolano Terme, Italy*. Sedimentology, 46, 1145-1158.
- Hays, P.D., Grossman, E.L. (1991) – *Oxygen isotopes in meteoritic calcite cements as indicators of continental paleoclimate*. Geology, 19, 441-444.
- Heinz, W. (1983) – *Römische Thermen : Badewesen und Badeluxus im Römischen Reich*. Munich, 282 p.
- Henia, L. (1993) – *Climatologie et bilans de l'eau en Tunisie - Essai de régionalisation climatique par les bilans hydriques*. Faculté des Sciences humaines et sociales de Tunis, Publication de l'Université de Tunis, 2^{ème} série, 26, 391 p.
- Hirschenfeld, Y. (1997) – *The Roman baths of Hammat Gader : Final report*. Jérusalem.
- Hoffmann, F. (2005) – *Les tufs et travertins en Périgord-Quercy*. Karstologia, Mémoires-13, Presses Universitaires de Bordeaux, 263 p.
- Hooke, R.L. (2000) – *On the history of humans as geomorphic agents*. Geology, 28/9, 843-846.
- Horvatincić, N., Bronić, I.K., Obelić, B. (2003) – *Differences in the ^{14}C age, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of Holocene tufa and speleothems in the Dinaric Karst*. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 193, 139-157.
- Hostetter, E.R. (2007) – *The last flow of Water to the Baths of Caracalla: Age, Temperature and Chemistry*. In Acts of the Therme di Caracalla conference, Istituto Storico Austriaco 2007, sous presse.
- Ihlenfeld, C., Norman, M. D., Gagan, M. K., Drysdale, R. N., Maas, R., Webb, J. (2003) – *Climatic significance of seasonal trace element and stable isotope variations in a modern freshwater tufa*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 67/13, 2341-2357.
- Isserlin, B.S.J., Jones, R.E., Papamarinopoulos, St.P., Uren, J. (1994) – *The canal of Xerxes on the mount Athos Peninsula : Preliminary Investigations*. The annual British School at Athens, 89, 277-284.
- Janssen, A., Swennen, R. (1997) – *Petrography and geochemistry of the travertine deposit at Treignes (S. Belgium)*. Bulletin de la Société Belge de Géologie, 106, 97-115.

- Janssen, A., Swennen, R., Podoor, N., Keppens, E. (1999) – *Biological and diagenetic influence in recent and fossil tufa deposit from Belgium*. *Sedimentary Geology*, 126, 75-95.
- Jauzein, A. (1967) – *Contribution à l'étude géologique des confins de la dorsale tunsienne (Tunisie septentrionale)*. République tunisienne - secrétariat au plan et à l'économie nationale, annales des mines et de la géologie, 22, 475 p.
- Jimenez de Cisneros, C., Caballero, E., Jimenez-Lopez, C. (2006) – $\delta^{18}O$ and $\delta^{13}C$ of modern/ancient travertines from a thermal spring (Alicun de las Torres, Southern Spain). *Geoacta*, 5, 13-24.
- Joseph, C., Gilly, J.-C., Rodier, C. (2000) – *Système hydrique de l'aqueduc et genèse des concrétions*. In *L'aqueduc de Nîmes et le Pont du Gard - Archéologie, géosystème, histoire*, 2^{ème} édition, Éditions CNRS, 23-30.
- Kano, A., Matsuoka, J., Kojo, T., Fujii, H. (2003) – *Origin of annual laminations in tufa deposits, southwest Japan*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 191, 243-262.
- Kawai, T., Kano, A., Matsuoka, J., Ihara, T. (2006) – *Seasonal variation in water chemistry and depositional processes in a tufa-bearing stream in SW-Japan, based on 5 years of monthly observations*. *Chemical Geology*, 232, 33-53.
- Kawai, T., Kano, A., Hori, M. (2009) – *Geochemical and hydrological controls on biannual lamination of tufa deposits*. *Sedimentary Geology*, 213, 41-50.
- Kele, S., Demény, A., Siklósy, Z., Németh, T., Tóth, M., Kovacs, M. B. (2008) – *Chemical and stable isotope composition of recent hot-water travertines and associated thermal waters, from Egerszalók, Hungary: Depositional facies and non-equilibrium fractionation*. *Chemical geology*, 211, 53-72.
- Kele, S., Özkul M., Főizis I., Gökgöz, A., Oruç Baykara, M., Cihat Alçiçek, M., Németh, T. (2011) – *Stable isotope geochemical study of Pamukkale travertines: new evidences of low-temperature non-equilibrium calcite-water fractionation*. *Sedimentary Geology*, 238, 191-212.
- Labidi, S., Essafi, F., Mahjoubi, H. (2006) – *Estimation of the radiological risk related to the presence of radon 222 in a hydrotherapy centre in Tunisia*. *Journal of Radiological Protection*, 26, 309-316.
- Leveau, P. (2009) – *Les conditions environnementales dans le nord de l'Afrique à l'époque romaine. Contribution historiographique à l'histoire du climat et des relations homme/milieu*. In *Sociétés et climats dans l'Empire romain. Pour une perspective historique et systémique de la gestion des ressources en eau dans l'Empire romain*, Éditions Hermon E., Editoriale Scientifica, Naples, Italie, 309-348.
- Leveau, P., Paillet, J.-L. (1976) – *L'alimentation en eau de Caesarea de Maurétanie et l'aqueduc de Cherchell*. Éditions L'Harmattan, Paris, 185 p.
- Liu, Z., Zhang, M., Li, Q., You, S. (2003) – *Hydrochemical and isotope characteristics of spring water and travertine in the Baishuitai area (SW China) and their meaning for paleoenvironmental reconstruction*. *Environmental Geology*, 44, 698-704.
- Lojen, S., Dolenec, T., Vokal, B., Curkov, N., Mihelčić, G., Papesch, W. (2004) – *C and O stable isotope variability in recent freshwater carbonates (River Krka, Croatia)*. *Sedimentology*, 51, 361-375.
- Lyell, C. (1830) – *Principles of geology*. Adult Pbs Editions, 2006.

- Malissard, A. (2002) – *Les Romains et l'eau. Fontaines, salles de bains, thermes, égouts, aqueducs...* Éditions Les Belles-Lettres, Paris, 350 p.
- Manderscheid, H., Garbrecht, G. (1992) – *Etiam Fonto Novo Antoniano. L'acquedotto Antoniano alle Terme di Caracalla*. *Archeologia Classica*, XLIV, L'ERMA Bretschneider, Roma, 193-234.
- Marquer, L., Pomel, S., Abichou, A., Schulz, E., Kaniewski, D., Van Campo, E. (2008) – *Late Holocene high resolution palaeoclimatic reconstruction inferred from Sebkhah Mhabeul, southeast Tunisia*. *Quaternary Research*, 70(2), 240-250.
- Maurer, A.F. (2008) – *Les signaux biogéochimiques enregistrés dans les ossements humains de populations anciennes constituent-ils un document archéologique fiable?* Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), 260 p.
- Maxwell, J.A., Teesdale, W.J., Campbell, J.L. (1995) – *The Guelph PIXE software package II*. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B95, 407-421.
- Mitchell (1985) – *Dictionary of rocks*. Van Nostrand Reinhold Editions, New-York, 228 p.
- Ndiaye, M. (2007) – *A Multipurpose Software for Stratigraphic Signal Analysis*. Thèse de doctorat, Université de Genève, 118 p.
- Neely, J. (2002) – *A contextual study of the "fossilized" prehispanic canal systems of the Tehuacán valley, Puebla, Mexico*. *Antiquity*, 75/289, 505-506.
- Nicod, J. (1986) – *Les cascades des barrages de travertins de l'Argens supérieur (Var)*. *Méditerranée*, 57, 71-80.
- Nielsen, I. (1990) – *Thermae et Balnea. The Architecture and Cultural History of Roman Public Baths*. Éditions Aarhus, 2 vol., 194 et 212 p.
- Nouvel, P. (2011) – *Les sanctuaires des Villards-d'Héria (Jura). Apports des travaux anciens et récents*. In *Aspects de la romanisation dans l'Est de la Gaule*, Bibracte, 21(II), 619-628.
- Özkul, M., Varol, B., Alcicek, M.C. (2002) – *Depositional environments and petrography of the Denizli travertines*. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 125, 13-29.
- Paillet, J.-L. (1986) – *L'utilisation des concrétions de l'aqueduc de Nîmes en tant que matériau de construction*. *Méditerranée*, 57, 152-159.
- Pedley, H.M. (1990) – *Classification and environmental models of cool freshwater tufas*. *Sedimentary Geology*, 68, 143-154.
- Pedley, M. (2009) – *Tufas and travertines of the Mediterranean region: a testing ground for freshwater carbonate concepts and developments*. *Sedimentology*, 56, 221-246.
- Pedley, M., Andrews, J., Ordóñez, S., García del Cura, M.A., González Martín, J.-A., Taylor, D. (1996) – *Does climate control the morphological fabric of freshwater carbonates? A comparative study of Holocene barrage tufas from Spain and Britain*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 121, 239-257.

- Pentecost, A. (1995) – *The Quaternary travertine deposits of Europe and Asia Minor*. Quaternary Science Reviews, 14, 1005-1028.
- Pentecost, A. (2005) – *Travertine*. Springer editions, 445 p.
- Pentecost, A., Viles, H. (1994) – *A Review and Reassessment of Travertine Classification*. Géographie physique et Quaternaire, 48/3, 305-314.
- Petit, C. (2006) – *Géoarchéologie et anthropisation de l'environnement*. HDR, Université de Bourgogne, 147 p.
- Petit, C., Verrecchia, E. (1998) – *Rapport sur les concrétions carbonatées associées à un aqueduc gallo-romain (Site Le Nouret, Roissy)*. Rapport AFAN, inédit, 16 p.
- Petit, C., Camerlynck, C., Deweirdt, E., Durlet, C., Garcia, J.-P., Gauthier, E., Ollive, V., Richard, H., Wahlen, P. (2006) – *Géoarchéologie du site antique de Molesme en vallée de Laigne (Côte-d'Or) : mise en évidence de l'impact anthropique sur la sédimentation alluviale*. Gallia, 63, 263-281.
- Pomerol, C., Lagabrielle, Y., Renard, M. (2005) – *Éléments de géologie*. 13^e édition. Éditions Dunod.
- Raepsaet, G. (1993) – *Le diolkos de l'Isthme à Corinthe : son tracé, son fonctionnement ; Considérations techniques et mécaniques*. Bulletin de correspondance hellénique, 17, 233-261.
- Rapp Jr, G.R., Hill, C.L. (1998) – *Geoarchaeology: The Earth-science approach to archaeological interpretation*. Yale Univeristy Press, New Heaven and London, 274 p.
- Reille, M. (1990) – *Leçons de palynologie et d'analyse pollinique*. Éditions du CNRS, 206 p.
- Renault-Miskovsky, J., Texier, P.J. (1980) – *Intérêt de l'analyse pollinique détaillée dans les concrétions de grotte. Application à l'Abri Pié-Lombard (Tourettes-sur-Loup, Alpes-Maritimes)*. Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire, 17/3, 129-134.
- Richard, H. (1994) – *Évaluation de l'impact de l'homme sur la végétation : l'apport de la palynologie*. Histoire et Mesure, 9(3-4), 305-316.
- Richard, H. (1999) – *La palynologie*. In La botanique, Collection Archéologiques, Éditions Errance, Paris, 9-42.
- Riding, R. (1991) – *Classification of microbial carbonates*. In Calcareous Algae and Stromatolites, Springer-Verlag edition, Berlin, 21-51.
- Riser, J. (1999) – *Le Quaternaire. Géologie et milieux naturels*. Éditions Dunod, Paris.
- Rousseau, L., Beauchamp, J., Bahain, J.-J., Boudad, L., Deschamps, P., Falguères, C., Ghaleb, B., Lartigot, A.-S., Pozzi, J.-P. (2006) – *Premiers résultats d'une étude pluridisciplinaire menée sur des travertins quaternaires du Maroc*. Quaternaire, 17/4, 343-350.
- Rouvier, H. (1985) – *Géologie de l'Extrême-Nord tunisien : tectoniques et paléogéographies superposées à l'extrémité orientale de la chaîne nord-maghrébine*. République tunisienne - Ministère de l'économie nationale - Office national des Mines, annales des mines et de la géologie, 29, 427 p.

- Sadki, O. (1998) – *Étude des systèmes hydrothermaux du Nord de la Tunisie : Géochimie des interactions eaux-roches et circulation hydrothermale*. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de Tunis, Université Tunis III, 246 p.
- Salomon, J., Dran, J.-C., Guillou, T., Moignard, B., Pichon, L., Walter, P., Mathis, F. (2008) – *Present and future role of ion beam analysis in the study of cultural heritage materials: the example of the AGLAE facility*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B266, 2273-2278.
- Sant'Anna, L.G., Riccomini, C., Rodrigues-Francisco, B.H., Sial, A.N., Carvalho, M.D., Moura, C.A.V. (2004) – *The Paleocene travertine system of the Itaboraí basin, Southeastern Brazil*. Journal of South American Earth Sciences, 18, 11-25.
- Schultz, H.D. (1986) – *Schichtungen im Kalksinter der römischen Wasserleitung nach Köln. Eine Hilfe zur relativen Datierung*. In Atlas der römischen Wasserleitung nach Köln, K. Grewe (ed.), Rheinland Verlag, 263-268.
- Séiquer, G.M. (2006) – *La recuperación de los balnearios durante el Bajo Imperio*. Antig. crist., Murcia, 23, 159-184.
- Séiquer, G.M., Vivancos, A.E., Carrillo, J.G. (2003) – *El balneario romano de Fortuna estado de la cuestión y perspectivas de futuro*. Antig. crist., Murcia, 20, 79-182.
- Shaw, B.D. (1995) – *Environment and Society in Roman North Africa. Study in History and Archaeology*. Collected Studies Series, Aldershot, Varium, 12, 271 p.
- Sigurdsson, H., Carey, S., Cornell, W., Pescatore, T. (1985) – *The eruption of Vesuvius in A.D. 79*. National Geographic Research, 1(3), 332-387.
- Slim, H., Fauqué, N. (2001) – *La Tunisie antique. De Hannibal à Saint Augustin*. Éditions Mengès, Paris, 259 p.
- Solignac, M. (1927) – *Étude géologique de la Tunisie septentrionale*. Thèse de doctorat, Université de Tunis, 756 p.
- Sürmelihindi, G., Passchier, C.W., Spötl, C., Kessener, P., Bestmann, M., Jacob, D.E., Baykan, O.N. (2013) – *Laminated carbonate deposits in Roman aqueducts: Origin, processes and implications*. Sedimentology, 60/4, 961-982.
- Tarutoni, T., Clayton, R.N., Mayeda, T.K. (1969) – *The effect of polymorphism and magnesium substitution on oxygen fractionation between calcium carbonate and water*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 33, 986-996.
- Teib Helali, L. (2009) – *Géochimie, hydrodynamique et comportement thermique des eaux thermales de Korbous, Jebel-Oust et Hammam Bourguiba*. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences Mathématiques, Physiques et Naturelles, Université El Manar II, Tunis, 246 p.
- Thébert, Y. (2003) – *Thermes romains d'Afrique du Nord et leur contexte méditerranéen*. Études d'histoire et d'archéologie, BEFAR, 315.
- Treble, P., Shelley, J.M.G., Chappell, J., (2003) – *Comparison of high resolution sub-annual records of trace elements in a modern (1911–1992) speleothem with instrumental climate data from southwest Australia*. Earth and Planetary Science Letters, 216, 141-153.
- Treble, P., Chapell, J., Gagan, M.K., McKeegan, K.D., Harrison, T. M. (2005) – *In situ measurement of seasonal $\delta^{18}O$ variations and analysis of isotopic trends in a modern speleothem from southwest Australia*. Earth and Planetary Science Letters, 233, 17-32.

- Turi, B. (1986) – *Stable isotope geochemistry of travertines*. In Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, B.P. Fritz, J.-C. Fontes (eds), Amsterdam (Elsevier).
- Vaudour, J. (1981) – *Travertins et croûtes calcaires*. Mémoire de l'Association Française de Karstologie, Paris, 3, 203-210.
- Vaudour, J. (1986) – *Travertins holocènes et pression anthropique*. Méditerranée, 57, 168-173.
- Vermoere, M., Degryse, P., Vanhecke, L., Muchez, P., Pulissen, E., Smets, E., Waelkens, M. (1999) – *Pollen analysis of two travertine sections in Basköy (southwestern Turkey): implications for environmental conditions during the early Holocene*. Review of Palaeobotany and Palynology, 105, 93-110.
- Verrecchia, E., Freytet, P. (1989) – *Lexique des termes utilisés pour décrire les carbonates continentaux à l'échelle de la lame mince*. Méditerranée, 68, 75-83.
- Viles, H.A., Pentecost, A. (2007) – *Tufa and Travertine*. In Geochemical sediments and landscapes, Edited by D.J. Nash, S.J. McLaren, Blackwell Publishing, 173-199.
- Vita Finzi, C. (1969) – *The Mediterranean Valleys : Geological Changes in Historical Times*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Weisrock, A. (1986) – *Variations climatiques et périodes de sédimentation carbonatée à l'holocène - L'âge des dépôts*. Méditerranée, 57, 165-167.
- Wilkinson, B.H. (2005) – *Human as geologic agents: A deep-time perspective*. Geology, 33, 161-164.
- Winsborough, B.M., Caran, S.C., Neely, J.A., Valastro, Jr, S. (1996) – *Calcified microbial mats date Prehistoric canals – Radiocarbon assay of organic extracts from travertine*. Geoarchaeology, Vol. 11(1), 37-50.
- Yegül, F. (1992) – *Bath and bathing in Classical Antiquity*. Cambridge, Massachussetts, and London, England, 440 p.
- Young, J.E. (1992) – *Mining the earth*. Washington DC : Worldwatch Institute, Worldwatch Paper, 109, 1-53.

SOURCES ANCIENNES.

Frontin – *Des aqueducs de Rome*. Traduction : M. Nisard, Paris, 1856.

Hérodote – *Histoire*. Texte grec : Édition A.D. Godely, Cambridge, 1920. Traduction : Larcher, Édition Charpentier, 2 tomes, Paris, 1850.

Histoire Auguste, Les Empereurs romains des II^e et III^e siècles. Édition R. Laffont, coll. Bouquins, 1994, 1224 p.

Martial – *Épigrammes*. Traduction : C. Dubos, Éditions J. Chapelle, Paris.

Ovide – *Les Métamorphoses*. Vol. 3. Livres XI-XV. Traduction : G. Lafaye, Éditions Les Belles Lettres, Coll. C.U.F, Paris, 308 p.

Palladius – *De Re Rustica*. Les agronomes latins : Caton, Varron, Columelle, Palladius, Traduction : C.-F. Saboureux de la Bonneterie, Éditions Dubochet, Paris, 1844, 521 p.

Pline l'Ancien – *Histoire Naturelle*. Édition S. Schmitt, Bibliothèque de la Pléiade, 593, 2176 p.

Sénèque – *Lettres à Lucilius*. Oeuvres complètes de Sénèque, Traduction : J. Baillard, Paris, 1861.

Sénèque – *Questions Naturelles*. Oeuvres complètes de Sénèque, Traduction : J. Baillard, Paris, 1861.

Strabon – *Géographie*. Traduction : A. Tardieu, 1867.

Suétone – *Vie des douze Césars*. Traduction : H. Ailloud, Éditions Les Belles Lettres, Coll. des Universités de France, Paris, 1931.

Théophraste – *Livre des Pierres*. In Les lapidaires de l'Antiquité et du Moyen Age, Tome III : Les lapidaires grecs, Traduction : F. De Mély, Paris, 1902.

Thucydide – *Histoire de la Guerre du Péloponnèse*. Traduction : C. Zévort, Édition Charpentier, Paris, 1883.

Tite-Live – *Histoire Romaine. Livre I : Des origines lointaines à la fin de la royauté*. Traduction M. Nisard, 1864.

Vitruve – *De l'architecture*. L'architecture de Vitruve, Traduction : Ch.-L. Maufra, Paris.

LEXIQUE.

Affusion – Moyen qui consiste à verser en nappe et d’une faible hauteur une certaine quantité d’eau froide ou chaude sur une partie du corps.

Anticlinal – Pli résultant de la flexion ou de la torsion de roche, dessinant une courbure convexe vers le haut. Les éléments à l’intérieur de la courbure correspondent, avant la déformation, aux éléments situés les plus bas.

Apodyterium – Vestiaire dans les thermes romains.

Botryoïde, botryoïdale (adj.) – En forme de grappe de raisin ; s’applique, pour les roches, à certaines structures ou textures, en particulier à celles des concrétions.

Caldarium – Pièce chaude des thermes romains.

Curateur des eaux (*curator aquarum*) – Fonctionnaire de l’Empire romain chargé de la surveillance des installations hydrauliques urbaines utilisées pour l’adduction et la distribution des eaux d’alimentation, ainsi que pour l’évacuation des eaux usées.

Cyanophycées – Algues primitives, souvent considérées comme un groupe particulier, le plus souvent filamenteuse, surtout d’eau douce, mais aussi marines, pouvant former des incrustation calcaires de formes diverses (stromatolite, oncolite).

Distal – A distance de la source.

Extrusif – Se dit d’un dispositif tectonique où l’on observe des couches sédimentaires rigides traversant des couches sus-jacentes plus souples. Forme extrême de disharmonie.

Fabrique – Ensemble des caractères structuraux d’une roche.

Frigidarium – Bain froid des thermes romains.

Glacis alluvial – Forme de relief non structural qui consiste en une surface plane et peu inclinée où la roche en place est masquée par une épaisseur d’alluvions faible (glacis d’épandage) ou forte (glacis d’accumulation). Les glacis sont souvent creusés, selon leur pente, de rigoles peu profondes appelées rills.

Laconicum – Etuve sèche des thermes romains.

Nixtamalisation – Procédé culinaire méso-américain consistant au trempage des grains de maïs dans une solution alcaline.

Proximal – A proximité de la source.

Rendosol – Sol évolué sur roche calcaire.

Spéléothèmes – Concrétions karstiques (stalagmite, stalactite, etc.).

Stromatolithe (ou stromatolite) – Construction discoïde ou mamelonnée due à des cyanophycées (algues bleues).

Table de Peutinger (*Tabula Peutingeriana* ou *Peutingeriana Tabula Itinerari*) – Copie du XIII^e s. d’une ancienne carte romaine où figurent les routes et les villes principales de l’Empire romain. Également appelée « Carte des étapes de Castorius », il s’agit d’une représentation schématique, qui ne tient pas compte des échelles.

Tepidarium – Bain tiède des thermes romains.

Vadose – Se dit de l’eau qui percole dans le sous-sol, sans faire partie d’une nappe d’eau souterraine.

LISTE DES ILLUSTRATIONS.

LISTE DES FIGURES.

PARTIE A

Figure A.1. Les bassins en travertin du site de Pamukkale (Turquie).	35
Figure A.2. Répartition des travertins en Europe et Asie Mineure.	42
Figure A.3. Carrière dans le travertin en dôme (mound depositional system) du site d'Acqua Borra (Toscane, Italie).	44
Figure A.4. Source chaude de Bullicame (Latium, Italie) et dépôt de travertin en dôme.	44
Figure A.5. Modèle de dépôt de ride (fissure ridge travertine), travertin de Rapolene Terme (Toscane, Italie).	44
Figure A.6. Micro-gour au sein du travertin de Rapolene Terme (Toscane, Italie).	44
Figure A.7. Section transversale du dépôt de travertin de Rapolene Terme (Toscane, Italie).	44
Figure A.8. Modèle de morphologie en terrasse (terrace slope deposits), travertin de Bagni San Filippo (Toscane, Italie).	45
Figure A.9. Détail du travertin de Bagni San Filippo : « terrace walls » et « terrace pools ».	45
Figure A.10. Travertin de cascade dans la région de Korbous (Cap Bon, Tunisie).	46
Figure A.11. Répartition des tufs calcaires en Europe et Asie Mineure.	47
Figure A.12. Modèle de source perchée (perched springline model) de tufs calcaires, dépôt de la vallée de Tajuna, Espagne.	48
Figure A.13. Tuf calcaire fluvial avec formations stromatolithiques (microherms), dépôt du Parc Naturel de Ruidera, Espagne.	49
Figure A.14. Tuf calcaire de barrage, entre deux lagunes, dépôt du Parc Naturel de Ruidera, Espagne.	49
Figure A.15. Tuf calcaire lacustre, dépôt du Parc Naturel de Ruidera, Espagne.	50
Figure A.16. Cascade de tuf à Pont-en-Royans (Isère).	51
Figure A.17. Cascade de tuf à La Sône (Isère).	51
Figure A.18. Les principaux types de porosité des faciès de travertins.	52
Figure A.19. Litages dans le tuf calcaire de Rolampont (Haute-Marne).	52
Figure A.20. Croûte cristalline dense, blanche, laminée et fibreuse, typique d'une précipitation rapide.	55
Figure A.21. Faciès « Shrub travertine ».	55
Figure A.22. Faciès « Pisoid travertine ».	56
Figure A.23. « Radeaux » de calcite à la surface de l'eau (« hot water ice »).	56
Figure A.24. Faciès « Paper-thin raft » associé à des racines.	56
Figure A.25. « Coated bubble travertine », issu de l'encroûtement de bulles de gaz.	57
Figure A.26. Faciès « Reed travertine ».	57
Figure A.27. « Lithoclast travertine ».	57
Figure A.28. Diagramme $\delta^{18}\text{O}/\delta^{13}\text{C}$ (PDB) représentant les valeurs isotopiques de travertins et tufs calcaires mondiaux.	67
Figure A.29. Types de lamination des travertins s.l.	69
Figure A.30. Tronc d'arbre encroûté dans le travertin de Bagni San Filippo (Toscane, Italie).	72
Figure A.31. Fantômes de végétaux supérieurs dans la tuffière de Rolampont (Haute-Marne).	72
Figure A.32. Le site de Pamukkale sur la carte des aléas sismiques en Turquie.	72
Figure A.33. Canal de travertins à Pamukkale, fracturé à la suite de séismes.	72
Figure A.34. Le site de Pamukkale et la répartition géographique des cendres issues de l'éruption du Santorin.	73
Figure A.35. Le site de Paestum et la répartition géographique des cendres issues de l'éruption du Vésuve (24 août 79 A.D.).	73
Figure A.36. Temples grecs de Paestum (Italie, VI ^e s. av. J.-C.), construits en tuf calcaire.	76
Figure A.37. Temple grec de Ségeste (Sicile, V ^e s. av. J.-C.), construit en tuf calcaire (« phytoherm tufa »).	76
Figure A.38. Utilisation du Lapis tiburtinus dans les voûtes du Colisée à Rome (I ^{er} s. ap. J.-C.).	76
Figure A.39. Utilisation d'un tuf calcaire local dans les voûtes du Temple des Eaux de Zaghuan (Tunisie, II ^e s. ap. J.-C.).	77
Figure A.40. Utilisation du tuf calcaire dans la construction de voûtes de structures spécifiques de chauffe à Alésia (Côte d'Or).	77
Figure A.41. Carrière antique dans le dépôt de travertin de Hammam Biadha (Tunisie).	78
Figure A.42. Utilisation d'un travertin local dans les thermes antiques de Hammam Mellègue (Tunisie).	78
Figure A.43. Eglise de Barbières (Drôme), construite en tuf calcaire de la région.	79
Figure A.44. Utilisation du travertin en enduit sur le mur d'une maison, village de Bagni San Filippo (Toscane, Italie).	79
Figure A.45. Bain de boue carbonatée à Bagnaccio (Latium, Italie).	81
Figure A.46. Carte des sites d'exploitation de travertin s.l. dans l'Empire romain et lieux cités par les auteurs antiques.	81
Figure A.47. Facteurs de contrôle du développement des tufs calcaires.	82
Figure A.48. Vestiges du barrage mycénien de Tyrinthe (Argolide, Grèce).	85
Figure A.49. Le diolkos antique de l'isthme de Corinthe.	85
Figure A.50. Influence d'un front de taille dans la tuffière de Rolampont (Haute-Marne) sur le développement du tuf calcaire.	98
Figure A.51. Un front de taille dans le travertin de Bullicame (Latium, Italie), témoignant de son extraction volontaire.	99
Figure A.52. Un « tecoaatl » dans le paysage de Puebla, Mexique.	99
Figure A.53. Concrétion externe de débordement de l'aqueduc gallo-romain de Nîmes.	101

Figure A.54a. Les dépôts carbonatés de l'aeduc de Fréjus.	102
Figure A.54b. Dépôts carbonatés dans l'aqueduc gallo-romain de Poitiers.	103
Figure A.55. Dépôts carbonatés dans l'aqueduc grec de Syracuse.	103
Figure A.56. Amas de dépôts carbonatés des thermes de Caracalla (Rome, Italie).	104
Figure A.57. Aqueduc comblé de travertin sur le site de Piscina Carletis (Latium, Italie).	105
Figure A.58. Observation en lame mince des dépôts thermaux de Vertault (Côte d'Or).	106
Figure A.59. Facteurs de contrôle (naturels et anthropiques) sur le développement des travertins s.l.	108
Figure A.60. Méthodologie multi-scalaire appliquée à l'analyse des travertins s.l.	109
Figure A.61. Sonde multiparamétrique de mesure de la température et du pH des eaux.	111
Figure A.62. Carottier à moteur thermique utilisé pour le prélèvement des travertins.	111
Figure A.63. Spectomètre de masse du laboratoire de Kiel.	113
Figure A.64. Le dispositif AGLAE (Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire).	115

PARTIE B

Figure B.1. Localisation du site d'Onellana (encadré) sur la Table de Peutinger (extrait).	120
Figure B.2. Le contexte hydroarchéologique nord-tunisien : le circuit de l'eau entre Zaghuan et Carthage.	121
Figure B.3. Les deux ensembles principaux du site de Jebel Oust.	123
Figure B.4. Plan partiel du site de Jebel Oust.	124
Figure B.5. Plan des thermes de Jebel Oust dans la phase II.	126
Figure B.6. Thermes de Jebel Oust, piscine T5. Vue vers l'est.	126
Figure B.7. Thermes de Jebel Oust, piscine T9. Vue vers le nord-est.	126
Figure B.8. Plan des thermes d'Aquae Flavianae.	126
Figure B.9. Plan des thermes de Jebel Oust dans la phase III.	127
Figure B.10. Plan des thermes de Jebel Oust dans la phase IV.	128
Figure B.11. Plan des thermes de Jebel Oust dans la phase IV, avant-dernier état.	128
Figure B.12. Plan des thermes de Jebel Oust dans la phase IV, dernier état.	129
Figure B.13. Carrière de calcaire gris sur le versant du Petit Oust.	130
Figure B.14. Dallage en calcaire gris de Jebel Oust du sol de la salle T17 des thermes.	131
Figure B.15. Colonne en calcaire gris de la salle T9 des thermes de Jebel Oust.	131
Figure B.16. Moellons en croûte calcaire dans les murs des thermes de Jebel Oust.	131
Figure B.17. Colonnes en calcaire lacustre de la salle T5 des thermes de Jebel Oust, et détail des lamines précipitées.	132
Figure B.18. Rainures d'extraction dans le travertin naturel du site de Jebel Oust.	132
Figure B.19. Dalles de couverture en travertin de l'aqueduc thermal antique de Jebel Oust.	132
Figure B.20. Echancrures verticales dans le travertin de la salle T23 des thermes.	133
Figure B.21. Utilisation du travertin dans le mur de la salle T51 des thermes.	133
Figure B.22. Moellons en travertin dans le mur de la salle T6 des thermes.	133
Figure B.23. Calcite filonienne de Jebel Oust.	133
Figure B.24. Filon de calcite filonienne dans la carrière antique de Jebel Oust.	133
Figure B.25. Affleurement du calcaire marneux sur le versant du Jebel Oust.	134
Figure B.26. Escalier d'eau en marbre blanc de la salle T16 des thermes.	135
Figure B.27. Répartiteur d'eau en calcaire bioclastique situé actuellement dans les thermes.	135
Figure B.28. MNT de la région de Jebel Oust et situation du site archéologique (données SRTM).	137
Figure B.29. Carrière exploitant les calcaires du versant du Jebel Oust (en arrière-plan : le Jebel Zaghuan).	137
Figure B.30. Variabilité pluviométrique annuelle par rapport à la moyenne à Tunis et Zaghuan, de 1901 à 1980.	139
Figure B.31a. Totaux pluviométriques mensuels à Tunis.	139
Figure B.31b. Totaux pluviométriques saisonniers à Tunis.	139
Figure B.32. Inventaire des ressources en eau disponibles et typologie des aménagements hydrauliques romains.	141
Figure B.33. Reconstitution du taux de sédimentation de la Medjerda.	142
Figure B.34. Coupe géologique Jebel Oust-Zaghuan et modèle de fonctionnement du système hydrothermal régional.	145
Figure B.35. Classification des sources thermo-minérales de Tunisie dans un diagramme de Piper.	148
Figure B.36. Diagramme $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ des eaux de la région de Jebel Oust (et températures associées en °C).	151
Figure B.37. Plaque commémorative de la découverte de la source chaude par D. Gérini.	152
Figure B.38. Plan de situation des captages actuel et antique de Jebel Oust.	154
Figure B.39. Le captage actuel de la source chaude de Jebel Oust.	155
Figure B.40. Courbes d'évolution du pH (vert) et de la température (rouge) de l'eau chaude actuelle de Jebel Oust.	156
Figure B.41. Affleurement du travertin naturel au niveau du sanctuaire (a), du clivus (b) et des thermes (c).	159

Figure B.42. Restitution du dépôt de travertin naturel (lobe grisé) sur le versant du Jebel Oust.	161
Figure B.43. Les travertins anthropiques du site de Jebel Oust.	166
Figure B.44. Signature isotopique des travertins de Jebel Oust dans le diagramme $\delta^{18}\text{O}/\delta^{13}\text{C}$ (PDB).	167
Figure B.45. Évolution des valeurs du $\delta^{18}\text{O}$ et du $\delta^{13}\text{C}$ de l'échantillon laminé JO-07-95 de l'aqueduc thermal de Jebel Oust.	170
Figure B.46. Compositions isotopiques (carbone et oxygène) d'échantillons de travertin du site antique de Jebel Oust.	172
Figure B.47. Compositions isotopiques du carbone et de l'oxygène des travertins de Jebel Oust.	173
Figure B.48. Distribution spatiale des travertins anthropiques sur le versant du Jebel Oust.	174
Figure B.49. Le premier captage antique de la source chaude de Jebel Oust.	176
Figure B.50. Plan du captage supérieur de la source chaude antique (premier captage) et profils topographiques associés.	177
Figure B.51. Le second captage antique de la source de Jebel Oust.	178
Figure B.52. Plan du captage inférieur de la source chaude antique (second captage) et profils topographiques associés.	180
Figure B.53. Plan du second captage antique et morphologie de la grotte hydrothermale associée.	181
Figure B.54. Plan du secteur aval de la grotte hydrothermale.	183
Figure B.55. Profils transversaux de la rigole revêtue de plomb.	183
Figure B.56. Localisation des coupes C1, C2 et C3 sur le plan du site antique de Jebel Oust.	185
Figure B.57. Description et interprétation géoarchéologique de la coupe C1 du colmatage sédimentaire de l'aqueduc thermal.	188
Figure B.58. Vue zénithale de la canalisation thermique dans le secteur S18 de Jebel Oust.	189
Figure B.59. Fragment en céramique encroûté dans les niveaux d'oxydes de la canalisation.	189
Figure B.60. Description et interprétation géoarchéologique de la coupe C2 du colmatage sédimentaire de l'aqueduc thermal.	191
Figure B.61. Synthèse géoarchéologique des coupes C1 et C2 de l'aqueduc thermal de Jebel Oust.	193
Figure B.62. Dalle de couverture marquée de l'aqueduc thermal.	195
Figure B.63. Description et interprétation géoarchéologique de la coupe C3 du colmatage sédimentaire de l'aqueduc thermal.	196
Figure B.64. Restitution synthétique (profil ouest-est) des deux captages antiques de la source chaude de Jebel Oust.	199
Figure B.65. L'évent d'une source chaude sur le site de Geyser (Islande).	200
Figure B.66. Proposition de synthèse chronologique de la zone cultuelle de Jebel Oust d'après l'analyse géoarchéologique.	201
Figure B.67. Localisation des échantillons pour l'analyse des travertins anthropiques des thermes antiques de Jebel Oust.	203
Figure B.68. Planche pétrographique du faciès A défini dans les thermes antiques de Jebel Oust.	206
Figure B.69. Planche pétrographique du faciès B défini dans les thermes antiques de Jebel Oust.	209
Figure B.70. Planche pétrographique (suite de la Fig. B.69) du faciès B défini dans les thermes antiques de Jebel Oust.	210
Figure B.71. Planche pétrographique du faciès C défini dans les thermes antiques de Jebel Oust.	213
Figure B.72. Planche pétrographique (suite de la Fig. B.71) du faciès C défini dans les thermes antiques de Jebel Oust.	214
Figure B.73. Planche pétrographique du faciès D défini dans les thermes antiques de Jebel Oust.	216
Figure B.74. Planche pétrographique du faciès E défini dans les thermes antiques de Jebel Oust.	219
Figure B.75. Planche pétrographique du faciès F défini dans les thermes antiques de Jebel Oust.	221
Figure B.76. Répartition spatiale des faciès des travertins anthropiques dans les salles thermales de Jebel Oust.	223
Figure B.77. Signatures isotopiques (carbone et oxygène) des faciès des travertins anthropiques des thermes antiques.	224
Figure B.78. Plan des thermes de Hammat Gader (phase II, fin II ^e /début III ^e s.?).	224
Figure B.79. Localisation de l'échantillon JO-05-38 sur le plan de la phase IV des thermes.	226
Figure B.80. Acquisition du signal sur l'échantillon laminé JO-05-38 de la salle T1 des thermes.	227
Figure B.81. Signal brut obtenu par l'analyse des variations de niveaux de gris.	227
Figure B.82. Signal filtré reflétant la lamination du travertin.	228
Figure B.83. Détermination du nombre de lamines claires et sombres pour la séquence de l'échantillon de travertin.	229
Figure B.84. Variations d'épaisseur des lamines claires et sombres le long de la séquence sédimentaire (JO-05-38, salle T1).	231
Figure B.85. Évolution des valeurs du $\delta^{18}\text{O}$ et du $\delta^{13}\text{C}$ de l'échantillon JO-05-38.	231
Figure B.86. Echantillon de travertin montrant le faciès C1 (état 3) de la salle T6 des thermes.	233
Figure B.87. Conduite en terre cuite alimentant en eau thermique la salle T6 lors de l'état 4.	234
Figure B.88. Echantillon de travertin montrant le faciès C2 (état 4) de la salle T6 des thermes.	234
Figure B.89. Structures à croissance microbienne dans le travertin de l'état 4 de la salle T6.	234
Figure B.90. Canalisation à l'air libre provenant de T7 et alimentant la salle T6 en eau thermique lors de l'état 5.	235
Figure B.91. Echantillon de travertin montrant le faciès C3 (état 5) de la salle T6 des thermes.	236
Figure B.92. Structures micritiques à croissance rayonnante dans le travertin de l'état 4 de la salle T6.	236
Figure B.93. Le mur oriental de la salle T6 des thermes.	237
Figure B.94. Diagramme $\delta^{18}\text{O}/\delta^{13}\text{C}$ des valeurs isotopiques des faciès C1 (état 3), C2 (état 4) et C3 (état 5) de la salle T6.	238
Figure B.95. Echantillons verticaux dans le travertin de la salle T23 des thermes.	239
Figure B.96. Localisation des coupes A, B et C du bourrelet de travertin de la salle T5, sur le plan de la phase IV des thermes.	240
Figure B.97. Relevé et interprétation géoarchéologique de la coupe A dans le bourrelet de travertin de la salle T5 des thermes.	244
Figure B.98. Relevé et interprétation géoarchéologique des coupes B (en haut) et C (en bas) du travertin de la salle T5.	250
Figure B.99. Synthèse chronologique et géoarchéologique de la salle T5 au cours de la phase IV des thermes.	253

<i>Figure B.100. Analyse géoarchéologique du tuyau d'eau tiède de la salle T4 des thermes.</i>	258
<i>Figure B.101. Interprétation géoarchéologique de la carotte JO-07-56 prélevée dans le tuyau d'eau tiède de la salle T4.</i>	259
<i>Figure B.102. Evolution de la composition isotopique (carbone et oxygène) du travertin du tuyau d'eau tiède de T4.</i>	260
<i>Figure B.103. Graphiques des concentrations en Ca, Mg, Al, Fe et Sr d'un travertin de la salle T1.</i>	263
<i>Figure B.104. Chaîne opératoire d'une analyse palynologique en contexte archéologique.</i>	265
<i>Figure B.105. Contenu pollinique des espèces végétales représentatives d'échantillons du site de Jebel Oust.</i>	267
<i>Figure B.106. Nombre de grains de pollen (A.P. et N-A. P.) dans des échantillons de travertins anthropiques de Jebel Oust.</i>	270
<i>Figure B.107. Cortège pollinique (ramené en pourcentage) d'échantillons de travertins anthropiques du site de Jebel Oust.</i>	271
<i>Figure B.108. Dépôt de travertins sur les dalles murales cassées de la salle T15 des thermes de Jebel Oust.</i>	276

PARTIE C

<i>Figure C.1. Synthèse du potentiel de sites archéologiques.</i>	285
<i>Figure C.2. Modélisation de la gestion d'une source à travers l'analyse des travertins anthropiques s.l.</i>	287

LISTE DES TABLEAUX.

<i>Tableau 1. Facteurs d'enrichissement pour le système aqueux à trois températures.</i>	65
<i>Tableau 2. Composition élémentaire de l'eau thermique de Jebel Oust.</i>	148
<i>Tableau 3. Moyenne et écart-type des valeurs isotopiques des travertins de l'aqueduc antique de Jebel Oust.</i>	169
<i>Tableau 4. Moyenne et écart-type des valeurs isotopiques des travertins des thermes antiques de Jebel Oust.</i>	171
<i>Tableau 5. Moyenne et écart-type des valeurs isotopiques des faciès C1 et C2 du tuyau de la salle T4.</i>	261

ANNEXES.

Samples	SaSi (µg)	d13C ‰PDB	±13	d18O ‰PDB	±18	Secteur
7-86_1	443.0	1.78	0.01	-9.97	0.02	S20
7-86_2	770.3	3.33	0.01	-11.19	0.02	S20
7-86_3	814.6	3.49	0.01	-10.53	0.01	S20
7-86_4	1134.5	3.68	0.01	-10.68	0.02	S20
7-86_5	425.3	3.42	0.02	-11.42	0.02	S20
7-86_6	158.4	2.93	0.01	-10.46	0.02	S20
7-86_7	371.0	1.90	0.01	-10.30	0.02	S20
7-87_1	289.1	1.26	0.02	-9.03	0.04	S20
7-87_2	425.9	1.89	0.01	-8.62	0.01	S20
7-87_3	408.5	0.89	0.01	-8.29	0.03	S20
7-87_4	785.8	1.32	0.01	-7.79	0.01	S20
7-87_5	551.0	1.56	0.01	-9.74	0.02	S20
7-87_6	1741.5	0.67	0.01	-6.77	0.01	S20
7-87_7	410.5	2.34	0.01	-7.49	0.02	S20
7-87_8	351.9	2.20	0.01	-7.02	0.01	S20
7-87_9	198.0	-0.52	0.01	-6.59	0.02	S20
7-87_10	556.4	0.81	0.01	-7.76	0.02	S20
7-87_11	496.4	0.30	0.01	-7.96	0.02	S20
7-87_12	501.1	1.91	0.01	-7.96	0.01	S20
7-87_13	1012.9	1.61	0.01	-7.86	0.01	S20
7-87_14	768.0	1.93	0.01	-7.89	0.02	S20
7-88_1	389.0	0.28	0.01	-6.94	0.01	S20
7-88_2	503.4	1.51	0.02	-7.58	0.01	S20
7-88_3	373.5	2.10	0.01	-7.53	0.02	S20
7-88_4	523.0	1.58	0.01	-8.16	0.02	S20
7-88_5	727.3	2.36	0.01	-8.11	0.02	S20
7-88_6	194.2	2.55	0.02	-7.97	0.01	S20
7-88_7	522.4	2.12	0.02	-8.24	0.01	S20
7-88_8	883.2	2.56	0.01	-8.74	0.01	S20
7-88_9	1542.1	2.31	0.01	-8.43	0.01	S20
7-88_10	380.5	1.98	0.01	-8.71	0.01	S20
7-88_11	83.1	2.47	0.01	-8.66	0.02	S20
7-89_1	101.5	2.94	0.02	-8.24	0.02	S20
7-89_2	217.5	2.84	0.01	-8.65	0.02	S20
7-89_3	406.0	2.58	0.01	-8.56	0.02	S20
7-89_4	243.0	1.88	0.01	-8.62	0.01	S20
7-89_5	523.0	2.57	0.02	-8.53	0.01	S20
7-90_1	225.8	2.54	0.01	-8.81	0.01	S20
7-90_2	98.9	2.66	0.01	-7.91	0.01	S20
7-90_3	105.4	2.69	0.01	-8.70	0.02	S20
7-90_4	393.9	2.93	0.01	-8.36	0.01	S20
7-90_5	215.2	2.67	0.01	-8.54	0.02	S20
7-90_6	198.8	2.88	0.01	-8.15	0.01	S20
7-90_7	692.8	2.86	0.01	-8.29	0.01	S20
7-91_1	775.3	2.99	0.01	-9.05	0.01	S20
7-91_2	705.3	2.98	0.01	-9.35	0.02	S20
7-91_3	954.5	2.91	0.01	-8.81	0.02	S20
7-91_4	456.5	2.77	0.01	-9.15	0.02	S20
7-91_5	348.4	2.85	0.02	-8.94	0.03	S20
7-91_6	226.6	2.66	0.01	-9.08	0.01	S20
7-92_1	192.2	2.96	0.01	-9.31	0.01	S20
7-92_2	193.3	3.01	0.01	-9.12	0.01	S20
7-92_3	458.5	3.15	0.01	-9.05	0.01	S20
7-92_4	288.0	3.31	0.02	-9.15	0.03	S20
7-93_1	156.5	3.39	0.01	-9.17	0.01	S20
7-93_2	130.0	3.05	0.01	-9.62	0.02	S20
7-93_3	210.0	3.25	0.01	-10.21	0.02	S20
7-93_4	24.0	3.05	0.01	-9.02	0.03	S20
7-93_5	254.9	3.03	0.01	-8.86	0.02	S20
7-93_6	139.3	3.04	0.01	-9.05	0.01	S20
7-93_7	112.2	2.78	0.01	-9.00	0.02	S20

Annexe A - Résultats d’analyses des isotopes stables du carbone et de l’oxygène pour les échantillons de travertin du secteur S20, dans l’aqueduc à mi-pente.

Samples	SaSi (µg)	d13C ‰PDB	±13	d18O ‰PDB	±18	Secteur
7-95_1	194.2	2.50	0.03	-8.99	0.03	S20
7-95_2	199.2	2.45	0.01	-8.66	0.01	S20
7-95_3	308.0	1.87	0.01	-8.58	0.01	S20
7-95_4	254.9	1.55	0.02	-8.42	0.03	S20
7-95_5	467.7	1.71	0.02	-8.31	0.03	S20
7-95_6	148.7	2.00	0.01	-8.52	0.01	S20
7-95_7	364.6	2.37	0.01	-9.06	0.03	S20
7-95_8	221.3	2.21	0.01	-8.19	0.01	S20
7-95_9	413.6	2.20	0.01	-8.47	0.03	S20
7-95_10	311.5	1.93	0.01	-8.45	0.01	S20
7-95_11	334.0	1.82	0.01	-8.33	0.01	S20
7-95_12	590.1	1.67	0.01	-8.18	0.03	S20
7-95_13	721.3	2.03	0.01	-8.64	0.02	S20
7-95_14	93.0	2.21	0.01	-8.49	0.03	S20
7-95_15	119.7	2.11	0.01	-7.93	0.02	S20
7-95_16	300.0	2.04	0.01	-8.31	0.02	S20
7-95_17	119.1	2.69	0.01	-9.08	0.02	S20
7-95_18	99.9	1.30	0.01	-7.42	0.03	S20
7-95_19	100.7	2.74	0.01	-9.25	0.02	S20
7-95_20	150.0	2.46	0.01	-9.05	0.02	S20
7-95_21	250.8	2.67	0.01	-8.93	0.01	S20
7-95_22	181.9	1.99	0.01	-9.13	0.02	S20
7-95_23	251.0	2.08	0.01	-9.01	0.02	S20
7-95_24	239.5	2.26	0.01	-9.00	0.02	S20
7-95_25	175.8	3.03	0.01	-9.77	0.01	S20
7-95_26	172.2	2.14	0.01	-9.16	0.02	S20
7-95_27	181.3	2.34	0.01	-9.28	0.02	S20
7-95_28	188.5	1.98	0.01	-8.81	0.01	S20
7-95_29	80.4	2.51	0.01	-9.00	0.01	S20
7-95_30	303.5	2.59	0.01	-8.99	0.02	S20
7-95_31	77.8	2.17	0.01	-9.45	0.02	S20
7-96_1	439.4	2.56	0.01	-9.04	0.03	S20
7-96_2	148.4	2.31	0.01	-8.71	0.01	S20
7-96_3	369.2	2.60	0.01	-8.77	0.02	S20
7-96_4	290.3	2.75	0.01	-8.84	0.01	S20
7-96_5	127.5	2.83	0.01	-8.43	0.02	S20
7-96_6	67.2	2.69	0.02	-8.62	0.02	S20
7-96_7	401.1	2.58	0.02	-8.82	0.03	S20
7-96_8	790.1	3.09	0.01	-8.60	0.02	S20
7-96_9	214.2	2.10	0.01	-8.20	0.02	S20
7-96_10	186.9	2.17	0.01	-8.44	0.01	S20
7-96_11	201.8	3.04	0.01	-8.84	0.01	S20
7-96_12	199.3	2.85	0.01	-8.37	0.01	S20
7-96_13	316.7	3.02	0.01	-8.98	0.01	S20
7-96_14	301.8	2.60	0.01	-9.09	0.01	S20
7-96_15	533.2	3.32	0.01	-8.75	0.02	S20
7-96_16	379.6	2.74	0.01	-8.75	0.02	S20
7-96_17	407.4	2.83	0.02	-9.01	0.02	S20
7-96_18	371.2	3.03	0.01	-8.82	0.01	S20
7-96_19	244.5	2.95	0.01	-8.96	0.02	S20
7-96_20	157.7	3.12	0.01	-8.81	0.01	S20
7-96_21	238.2	2.96	0.01	-9.11	0.02	S20
7-96_22	204.2	3.24	0.01	-8.76	0.01	S20
7-96_23	293.1	2.82	0.01	-9.13	0.02	S20
7-96_24	391.0	2.59	0.02	-8.30	0.01	S20

Annexe B - Résultats d’analyses des isotopes stables du carbone et de l’oxygène pour les échantillons de carbonates provenant des sites de Villards-Fontaine et d’Essarois, Côte d’Or.

Samples	SaSi (µg)	d13C ‰PDB	±13	d18O ‰PDB	±18	Secteur
VIL07-1	195.99	-9.97	0.01	-6.93	0.02	Villards-Fontaines
VIL07-2	556.55	-9.38	0.01	-6.75	0.01	Villards-Fontaines
VIL07-3	388.51	-9.63	0.01	-6.62	0.02	Villards-Fontaines
VIL07-4	217.17	-9.66	0.01	-6.95	0.01	Villards-Fontaines
VIL07-5	379.94	-9.64	0.01	-6.98	0.01	Villards-Fontaines
VIL07-6	318.43	-9.70	0.01	-7.00	0.01	Villards-Fontaines
VIL07-7	349.73	-9.68	0.01	-7.02	0.01	Villards-Fontaines
ESS1	356.5	-9.13	0.01	-6.33	0.02	Essarois
ESS2	421.3	-9.62	0.01	-6.32	0.02	Essarois

Samples	SaSi (µg)	d13C ‰PDB	±13	d18O ‰PDB	±18	Secteur
5-38-1	271.22	3.35	0.02	-10.19	0.03	T1
5-38-2	246.62	2.00	0.01	-9.18	0.02	T1
5-38-3	347.78	2.07	0.01	-8.78	0.02	T1
5-38-4	344.25	1.23	0.01	-8.62	0.02	T1
5-38-5	249.38	2.30	0.02	-9.50	0.01	T1
5-38-6	196.47	1.53	0.01	-9.12	0.02	T1
5-38-7	377.46	2.77	0.01	-9.82	0.03	T1
5-38-8	241.80	2.08	0.01	-9.07	0.01	T1
5-38-9	150.01	2.12	0.01	-8.86	0.02	T1
5-38-10	188.98	2.00	0.01	-8.82	0.01	T1
7_49_1	84.76	1.91	0.01	-8.63	0.01	T1
7_49_2	102.25	2.16	0.02	-8.39	0.03	T1
7_49_3	87.46	2.18	0.02	-8.02	0.02	T1
7_49_4	165.52	2.01	0.01	-8.50	0.02	T1
7_49_5	83.70	1.71	0.01	-8.51	0.02	T1
7_49_6	146.52	1.87	0.01	-8.35	0.03	T1
7_49_7	42.79	1.98	0.01	-8.39	0.01	T1
7_49_8	115.95	2.07	0.01	-8.41	0.03	T1
7_49_9	150.63	2.03	0.01	-8.41	0.02	T1
7_49_10	77.62	2.09	0.01	-8.47	0.03	T1
7_49_11	96.85	2.33	0.02	-8.55	0.02	T1
7_49_12	79.38	2.27	0.01	-8.70	0.01	T1
7_49_13	129.45	2.14	0.01	-8.32	0.02	T1
7_49_14	150.88	2.09	0.02	-8.54	0.03	T1
7_49_15	244.81	2.13	0.01	-8.47	0.01	T1
7_49_16	149.59	2.22	0.02	-8.32	0.03	T1
7_49_17	538.13	2.02	0.01	-8.04	0.03	T1
7_49_18	385.14	2.09	0.02	-7.97	0.03	T1
7_49_19	387.30	2.04	0.02	-8.08	0.03	T1
7_49_20	76.86	2.06	0.01	-8.29	0.01	T1
7_49_21	167.11	0.84	0.01	-8.51	0.02	T1
7_49_22	28.70	0.29	0.01	-8.22	0.04	T1
7_49_23	134.70	3.05	0.02	-10.90	0.01	T1
7_49_24	65.24	3.33	0.02	-11.05	0.02	T1
7_49_25	107.27	3.34	0.01	-10.63	0.02	T1
7_49_26	174.31	3.26	0.02	-10.97	0.01	T1
7_49_27	52.74	3.26	0.02	-10.56	0.03	T1
7_49_28	92.84	3.32	0.01	-10.00	0.02	T1
7_49_29	186.31	3.09	0.02	-9.76	0.03	T1

Samples	SaSi (µg)	d13C ‰PDB	±13	d18O ‰PDB	±18	Secteur
6_10_1	321.0	3.92	0.02	-7.10	0.03	T23
6_10_2	174.5	3.27	0.02	-6.82	0.02	T23
6_10_3	82.6	3.46	0.02	-6.86	0.03	T23
6_10_4	84.4	3.86	0.02	-6.64	0.02	T23
6_10_5	59.2	3.78	0.02	-6.92	0.03	T23
6_10_6	135.2	4.36	0.02	-6.81	0.02	T23
6_10_7	74.6	4.15	0.01	-6.61	0.01	T23
6_10_8	166.7	4.26	0.01	-6.88	0.01	T23
6_10_9	111.4	3.79	0.01	-6.93	0.02	T23
6_10_10	170.3	3.90	0.01	-6.51	0.02	T23
6_10_11	93.0	3.61	0.03	-6.64	0.05	T23
6_10_12	94.6	3.94	0.02	-8.07	0.02	T23
6_10_13	83.4	3.90	0.01	-7.36	0.03	T23
6_10_14	267.5	4.10	0.01	-6.66	0.02	T23
6_10_15	143.7	4.41	0.02	-6.29	0.01	T23
7_106_1	67.0	1.94	0.02	-5.98	0.02	T19
7_106_2	52.9	2.60	0.01	-7.21	0.01	T19
7_106_3	144.4	3.25	0.01	-7.09	0.01	T19
7_106_4	97.4	-2.49	0.01	-7.76	0.03	T19
7_106_5	91.1	4.87	0.02	-6.52	0.04	T19
7_106_6	242.7	1.77	0.01	-7.15	0.02	T19
5_53_1	73.8	2.90	0.01	-7.89	0.02	T20
5_53_2	146.3	3.40	0.01	-8.07	0.01	T20
5_53_3	107.0	3.36	0.02	-7.75	0.01	T20
5_53_4	86.5	3.56	0.02	-7.34	0.04	T20
5_53_5	172.0	3.36	0.02	-7.65	0.02	T20
5_53_6	164.0	3.94	0.02	-7.79	0.03	T20
5_53_7	78.8	3.62	0.01	-7.10	0.01	T20
5_53_8	55.4	2.95	0.01	-7.10	0.02	T20
5_53_9	39.9	3.74	0.01	-7.20	0.01	T20
5_53_10	89.1	3.60	0.03	-7.60	0.03	T20
5_53_11	130.5	3.58	0.02	-7.17	0.02	T20
5_53_12	231.2	4.66	0.02	-6.97	0.03	T20
5_53_13	269.4	3.50	0.02	-7.41	0.01	T20
5_53_14	105.8	3.17	0.01	-7.49	0.02	T20

Samples	SaSi (µg)	d13C ‰PDB	±13	d18O ‰PDB	±18	Secteur
5-39-1	722.16	3.37	0.01	-8.45	0.01	T5
5-39-2	370.23	3.25	0.01	-7.69	0.02	T5
5-39-3	470.94	2.99	0.01	-7.57	0.02	T5
5-39-4	866.82	2.83	0.01	-7.46	0.01	T5
5-39-5	734.23	2.77	0.01	-7.75	0.01	T5
5-39-6	805.73	2.40	0.01	-7.36	0.02	T5
7_44_1	19.4	2.97	0.02	-8.65	0.03	T5
7_44_2	49.2	2.80	0.02	-8.70	0.02	T5
7_44_3	23.6	3.09	0.03	-8.92	0.03	T5
7_44_4	63.2	3.07	0.01	-8.99	0.02	T5
7_44_5	73.6	3.50	0.01	-10.16	0.02	T5
7_44_6	66.2	3.32	0.02	-10.10	0.03	T5
7_44_7	31.1	3.33	0.01	-10.23	0.02	T5
7_44_8	85.4	3.33	0.02	-10.55	0.03	T5
7_44_9	59.0	3.47	0.02	-10.53	0.03	T5
7_44_10	64.9	3.41	0.01	-10.69	0.03	T5
7_44_11	76.5	3.60	0.01	-10.68	0.02	T5
7_44_12	66.3	3.58	0.02	-10.39	0.03	T5
7_44_13	50.7	1.00	0.01	-8.83	0.02	T5
7_44_14	52.5	-2.62	0.01	-6.93	0.02	T5
7_44_15	60.4	-1.27	0.02	-8.28	0.02	T5
7_44_16	67.6	0.37	0.01	-9.22	0.01	T5
7_44_17	57.2	-3.00	0.01	-7.20	0.02	T5
7_44_18	62.4	-0.14	0.01	-7.94	0.02	T5
7_44_19	88.4	2.36	0.01	-7.73	0.01	T5
7_44_20	86.0	1.59	0.01	-5.81	0.03	T5
7_44_21	42.1	2.08	0.02	-5.83	0.03	T5
7-41_1	126.9	-0.48	0.01	-7.93	0.01	T5
7-41_2	282.1	0.96	0.02	-7.42	0.02	T5
7-41_3	272.1	2.79	0.01	-9.57	0.01	T5
7-41_4	203.7	0.69	0.01	-7.27	0.02	T5
7-41_5	368.8	2.40	0.02	-8.76	0.02	T5
7-41_6	170.5	2.25	0.01	-8.15	0.01	T5
7-41_7	137.4	2.34	0.01	-9.04	0.03	T5
7-41_8	227.7	2.57	0.01	-9.65	0.01	T5
7-41_9	147.6	2.86	0.01	-9.79	0.03	T5
7-41_10	121.9	2.46	0.01	-9.44	0.02	T5
7-41_11	157.2	2.54	0.01	-9.40	0.02	T5
7-41_12	71.7	-0.48	0.01	-7.24	0.02	T5

Samples	SaSi (µg)	d13C ‰PDB	±13	d18O ‰PDB	±18	Secteur
5_37_1	176.0	3.60	0.01	-6.35	0.02	T11
5_37_2	102.7	3.95	0.02	-6.13	0.03	T11
5_37_3	91.3	4.39	0.02	-6.03	0.03	T11
5_37_4	105.3	3.13	0.02	-6.00	0.03	T11
5_37_5	162.6	3.27	0.01	-6.29	0.02	T11
5_37_6	88.3	3.93	0.02	-6.48	0.03	T11
5_37_7	198.4	2.69	0.02	-6.96	0.03	T11
5_37_8	167.6	3.42	0.01	-7.56	0.02	T11
5_37_9	110.6	3.54	0.02	-7.31	0.03	T11
5_37_10	126.5	3.61	0.01	-7.40	0.02	T11
5_37_11	103.3	3.55	0.01	-6.72	0.03	T11
5_37_12	138.7	2.93	0.01	-6.95	0.02	T11
5_29_1	103.8	1.92	0.01	-6.61	0.03	T12
5_29_2	104.2	4.10	0.01	-6.72	0.03	T12
5_29_3	133.9	3.39	0.01	-7.27	0.02	T12
5_29_4	76.8	3.37	0.03	-6.71	0.02	T12
5_29_5	216.3	3.00	0.01	-7.02	0.01	T12
5_29_6	126.9	2.02	0.01	-6.96	0.02	T12
5_29_7	79.2	3.36	0.02	-7.10	0.02	T12
5_29_8	156.0	2.66	0.02	-7.30	0.02	T12
5_29_9	93.4	3.48	0.02	-7.85	0.03	T12
5_29_10	110.4	3.59	0.02	-7.44	0.02	T12
5_29_11	113.2	3.34	0.01	-8.25	0.02	T12
5_29_12	250.5	3.35	0.01	-8.13	0.01	T12
7_103_1	110.7	3.70	0.01	-7.06	0.03	T13

Samples	Sa/Si (µg)	d13C ‰PDB	±13	d18O ‰PDB	±18	Secteur
7_66_1	49.7	0.81	0.01	-9.32	0.02	T9
7_66_2	40.4	1.23	0.02	-9.42	0.03	T9
7_66_3	73.5	0.47	0.02	-8.37	0.03	T9
7_66_4	113.0	0.10	0.02	-8.28	0.02	T9
7_66_5	37.4	-0.08	0.02	-7.99	0.03	T9
7_66_6	102.7	0.46	0.01	-7.66	0.02	T9
7_66_7	69.4	-0.68	0.01	-7.60	0.02	T9
7_66_8	43.3	0.61	0.02	-8.37	0.02	T9
7_66_9	36.6	1.54	0.02	-9.39	0.04	T9
7_66_10	63.6	1.53	0.01	-9.63	0.02	T9
7_66_11	102.5	-0.04	0.01	-7.49	0.01	T9
7_66_12	59.5	-1.66	0.01	-7.08	0.02	T9
7_66_13	97.1	-1.32	0.01	-6.85	0.02	T9
7_66_14	42.9	-2.05	0.02	-6.55	0.02	T9
7_66_15	119.9	-1.16	0.01	-7.59	0.01	T9
7_66_16	49.4	-0.42	0.01	-7.86	0.02	T9
7_66_17	78.5	1.82	0.01	-9.93	0.02	T9
7_66_18	117.8	-1.14	0.01	-7.88	0.02	T9
7_66_19	95.5	-0.67	0.01	-7.85	0.02	T9
7_66_20	104.0	-0.35	0.01	-7.67	0.01	T9
7_66_21	114.5	0.41	0.03	-8.24	0.03	T9
7_66_22	110.2	0.76	0.02	-8.68	0.05	T9
7_66_23	69.7	1.87	0.01	-9.49	0.02	T9
7_66_24	138.7	1.89	0.01	-9.90	0.01	T9
7_66_25	104.2	0.00	0.02	-8.26	0.01	T9
7_66_26	59.3	1.57	0.01	-9.59	0.02	T9
7_66_27	48.9	2.54	0.02	-10.70	0.05	T9
7_66_28	89.0	2.10	0.02	-10.38	0.04	T9
7_66_29	67.7	2.01	0.01	-10.40	0.02	T9
7_66_30	114.8	1.96	0.01	-10.10	0.02	T9
7_66_31	106.2	-2.12	0.01	-6.92	0.01	T9
7_66_32	76.3	0.60	0.01	-8.31	0.02	T9
7_66_33	43.2	2.37	0.02	-9.65	0.01	T9
7_66_34	60.4	2.51	0.01	-9.70	0.01	T9
7_66_35	70.8	1.13	0.01	-9.51	0.02	T9
7_66_36	130.4	1.84	0.01	-9.10	0.02	T9
7_66_37	62.7	1.86	0.01	-8.80	0.01	T9
7_66_38	92.0	2.11	0.01	-8.98	0.01	T9
7_66_39	50.3	2.39	0.01	-9.45	0.02	T9
7_66_40	124.5	2.54	0.01	-9.41	0.02	T9
7_66_41	120.8	2.13	0.01	-9.40	0.02	T9
7_66_42	124.9	2.02	0.01	-9.86	0.03	T9
7_66_43	119.8	2.31	0.01	-9.38	0.02	T9
7_66_44	359.6	2.09	0.01	-9.10	0.03	T9
7_63_1	31.4	1.71	0.01	-10.46	0.03	T9
7_63_2	36.5	1.30	0.01	-9.97	0.02	T9
7_63_3	64.7	-0.63	0.01	-6.48	0.02	T9
7_63_4	58.1	-0.54	0.02	-6.44	0.04	T9
7_63_5	54.2	0.04	0.01	-6.41	0.01	T9
7_63_6	32.6	0.38	0.02	-7.30	0.02	T9
7_63_7	50.0	-0.18	0.01	-6.84	0.02	T9
7_63_8	54.5	2.05	0.02	-8.65	0.02	T9
7_63_9	53.5	2.56	0.01	-8.98	0.02	T9
7_63_10	63.8	2.57	0.01	-9.78	0.01	T9
7_63_11	29.3	3.01	0.02	-9.85	0.04	T9
7_63_12	37.1	2.68	0.02	-8.97	0.02	T9
7_63_13	44.8	2.99	0.01	-8.78	0.03	T9
7_63_14	46.7	2.79	0.02	-8.84	0.02	T9
7_63_15	52.8	3.06	0.01	-9.66	0.01	T9
7_63_16	50.4	2.95	0.01	-9.29	0.02	T9
7_63_17	80.9	3.18	0.01	-9.44	0.01	T9
7_63_18	70.3	3.39	0.01	-10.11	0.01	T9

Annexe D - Résultats de l'analyse PIXE à l'aide d'AGLAE de l'échantillon JO-07-49 provenant de la salle T1 de thermes antiques de Jebel Oust.

Chaque mesure de la composition élémentaire (*samples*) correspond à un pas continu de 192 μm .

Chaque mesure de la composition élémentaire (*samples*) correspond à un pas continu de 192 μm .

[illegible]

Samples	BEO	Na																																														
		Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Sr	Pb	Hf	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	W	Au	Pb		
24000001.00003	10053	5444	10715	24738	313	6949	1943	4413	616803	786	260	0	0	543	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	61803	569	79	512	4109	18	30	60	379	0	0	20	751	0	168	0	143	0	0	0	0	0	0	
24000001.00018	8545	7283	8589	28584	3598	6277	2294	4250	605257	1578	0	0	0	494	5983	0	0	98	104	0	0	0	0	0	0	605257	600	0	28	216	4245	24	19	87	398	0	0	0	1114	0	109	0	0	0	0	0	0	0
24000001.00149	7588	2862	873	15798	943	6744	2657	3064	610636	577	248	0	0	0	1017	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6739	1789	0	0	311	2775	0	0	66	445	0	0	0	1054	0	0	246	81	56	100	0	0	0	
24000001.00150	2918	0	13237	3549	0	7226	2418	4963	610439	989	0	0	0	7975	0	1195	0	1464	0	0	0	0	0	0	13888	61049	576	0	0	267	5652	83	43	35	454	21	20	0	1152	0	69	99	636	0	0	0	0	
24000001.00151	8545	7283	8589	28584	3598	6277	2294	4250	605257	1578	0	0	0	494	5983	0	0	98	104	0	0	0	0	0	0	605257	600	0	28	216	4245	24	19	87	398	0	0	0	1114	0	109	0	0	0	0	0	0	
24000001.00152	7588	2862	873	15798	943	6744	2657	3064	610636	577	248	0	0	0	1017	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6739	1789	0	0	311	2775	0	0	66	445	0	0	0	1054	0	0	246	81	56	100	0	0		
24000001.00153	8007	0	4854	14909	0	4206	1185	2594	654699	753	1178	0	0	712	4458	0	0	0	1010	0	0	0	0	0	0	1624	654699	979	0	0	339	3952	0	13	80	542	0	5	31	20	806	0	0	0	52	0	0	
24000001.00154	11392	2181	4805	3665	1146	6774	2592	2699	646964	582	0	209	441	2881	0	0	0	509	0	0	0	0	0	0	0	1317	646964	411	0	23	255	3646	27	0	98	527	0	25	107	0	0	665	70	515	54	0	0	
24000001.00155	0	4516	6570	15512	2141	5183	1464	2592	646964	653	0	0	0	1048	5223	0	0	1296	0	825	0	0	0	0	0	64909	1227	0	0	396	3899	0	10	85	548	6	14	873	0	133	59	284	45	0	0			
24000001.00156	8334	371	4843	15124	0	5358	3465	2607	642827	673	0	613	345	8186	0	1976	0	1223	0	0	0	0	0	0	0	642828	715	20	109	286	4162	53	16	67	497	14	0	0	1011	0	0	0	0	0	67	0	0	
24000001.00157	0	5199	6613	15810	147	5307	1773	3467	648388	371	862	0	431	4899	0	422	0	0	0	0	0	0	0	0	4202	648388	0	0	23	212	3667	66	6	56	478	6	20	0	1129	0	0	0	665	70	499	32	0	
24000001.00158	11532	3877	892	11472	0	4950	1761	1764	694989	627	0	221	0	0	3642	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3336	694989	403	21	0	314	3688	16	0	65	505	0	0	0	25	1041	0	75	0	0	0	0	0	
24000001.00159	3338	7764	17389	25899	28007	3007	1353	3827	608914	802	0	0	0	7812	0	0	0	826	0	0	0	0	0	0	3881	608914	427	0	97	247	489	46	13	26	445	24	0	9	14	852	0	0	0	0	27			
24000001.00160	0	4038	10338	20369	1704	5046	1372	314	639389	746	0	783	251	4245	0	0	343	493	0	0	0	0	0	0	0	639389	548	116	0	260	361	36	9	44	497	0	0	0	802	0	0	0	0	54	51	0	0	
24000001.00161	5448	3528	4505	1060	1663	6565	2987	4045	657825	278	0	0	0	3848	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	657825	204	0	167	146	1135	15	47	224	0	0	0	1041	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
24000001.00162	3405	4822	6708	15880	1344	6135	3684	2484	644142	400	0	424	595	842	0	470	464	2624	0	0	0	0	0	0	2086	644143	293	217	34	616	3884	78	20	27	468	31	0	57	894	0	0	0	556	0	0			
24000001.00163	9924	2607	17088	35588	1926	6698	3310	5237	588881	1124	254	230	0	871	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7315	588880	721	66	58	448	5277	102	7	35	353	6	7	0	887	0	0	44	0	0	0	0		
24000001.00164	7209	2156	4808	19078	1779	2241	2564	631038	795	0	0	0	0	820	740	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2568	631037	465	122	0	463	3928	0	0	46	411	0	6	8	822	0	0	130	0	0	593	0	0	
24000001.00165	9719	3608	7730	17635	1598	6080	2281	2983	634627	673	310	0	0	5238	0	0	0	1375	0	0	0	0	0	0	4414	634627	334	0	419	5027	152	36	45	435	13	14	0	1098	0	0	0	0	0	58	17	0		
24000001.00166	7708	3434	9549	17505	0	6103	2585	3200	641026	805	328	1112	4248	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7033	641026	478	133	0	890	3424	0	15	44	393	0	0	0	965	0	0	0	0	0	0	0	0	
24000001.00167	6424	3384	7234	17271	465	2741	2962	629521	483	310	0	0	0	3863	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6429	629521	668	0	30	188	5768	34	23	55	444	0	0	18	1070	0	184	0	0	0	0	0		
24000001.00168	6127	1702	6477	18364	2084	5301	2524	309	637650	852	0	0	617	3117	0	0	0	1212	0	0	0	0	0	0	637650	64	0	64	247	3748	9	14	19	411	6	7	9	767	0	47	0	0	15	0	0			
24000001.00169	11394	2192	10996	3072	0	5875	2912	3944	61246	474	293	296	235	3924	0	0	0	580	0	0	0	0	0	0	0	5514	61246	717	0	39	330	3990	6	19	58	441	0	11	0	16	093	0	0	342	0	10	0	
24000001.00170	3705	3339	14150	25800	2796	4727	3808	3050	614034	1016	0	375	0	5337	0	0	0	1319	0	0	0	0	0	0	0	61934	375	114	42	566	4794	33	28	452	0	0	0	1064	0	148	0	0	0	38	40	0		
24000001.00171	16482	2579	11018	2317	0	6814	3723	374	617434	1304	188	0	0	4277	0	0	0	643	0	0	0	0	0	0	0	63921	258	0	0	361	4445	48	23	31	498	14	0	65	710	0	27	0	363	56	56			
24000001.00172	4352	2932	6754	12353	1085	6152	2545	3083	639210	968	0	0	624	668	0	0	0	1419	0	0	0	0	0	0	0	63921	258	0	0	361	4445	48	23	31	498	14	0	65	710	0	27	0	363	56	56			
24000001.00173	9878	3554	11688	2009	0	6249	3008	508	638819	0	0	0	0	4823	0	0	0	1478	0	0	0	0	0	0	0	6154	638819	784	0	14	210	5655	0	5	27	544	0											

Sources	Gouvernorat	T °C	Débit	Éléments majeurs (mg/l)								
				Ca	Mg	Na	K	Bicarbonates	Sulfates	Cl	F	Nitrates
Ain El Hammam	Biarritz	23	2,5	86,86	8,21	36,37	1,79	294,66	33,15	72,78	0,2	4,69
H. Sidi Issa Athys	Biarritz	42	faible	1240	121,6	3100	74	360	2300,5	5971,5	1	traces
H. Sidi Abdoukader	Biarritz	43	faible	1120	182,4	3000	78	351	2235,36	5502,5	1	traces
H. Charfa	Biarritz	42	nd	960	328,3	2650	49	378,2	2292,3	5413,7	1	traces
H. Elmagyar	Biarritz	45	0,3	900	698,8	2400	49	353,8	952,5	4686	1,55	traces
H. Sidi Salim	Biarritz	31,5	0,15	380	43	1583	26,3	958	70	2800	nd	nd
Ain Hammam - Ougue	Biarritz	38,5	1	54	25	215	16,7	348	40	270	nd	nd
H. El Arnes	Biarritz	51	nd	800	496	3020	78	439,2	2047	5484,7	1,75	traces
Ain Melis (Mila)	Béja	18	3	52,53	5,3	35,24	0,52	260,77	26,76	51,96	0,5	32,15
H. Ain Ghera	Béja	17	faible	76,65	4,13	27	1	202,8	20,24	39	0,59	5,67
H. Ain Salam	Béja	16,5	2 à 30	49	24,34	16,97	1,2	292,9	16,79	26,85	0,65	14,09
H. Ain Selis	Béja	31,5	5	224	21	268	6,6	906	26	585,75	1,5	nd
H. Kaf Elma	Béja	42	1	424	43,5	1370	29,6	414	1,5	2573	3,1	nd
H. Sayala	Béja	46	1	280	121,6	4306	26	355	903	7455	4,4	traces
Ain Gadia (Bella Regia)	Jendouba	21	3	90	10,53	28	1,17	122	13	130	0,45	25
Forage Berkoucha	Jendouba	21	40	48	12	22	2	90	14	36		
H. Ouchana	Jendouba	43	1,5	24	6,08	379,3	2,34	732	28,8	195,25	1,2	nd
H. Ourdaya	Jendouba	33	2	130	18,24	338,1	3,9	475,8	19,2	528,95	0,38	nd
H. Aït Eloua	Jendouba	40	0,5	986	249,28	17128	3,9	707,6	3456	23913	1,9	nd
H. B. Soussa boua	Jendouba	38	0,45	41,28	13,03	162,86	11,4	536,8	17,44	62,88	0,94	traces
H. B. Soussa boua	Jendouba	30	0,6	75,25	21,34	239,9	13,06	937,9	6	291	1,05	traces
H. B. Soussa populaire	Jendouba	48	1,8	98	18	275	14,5	537,6	6	293	1,05	traces
H. Elouhine	Jendouba	73	4	80	24,32	215	7	244	79	359	56	traces
H. Ain Bouamran	Jendouba	39	faible	40	11,18	396	20	856	14,76	286,25	0,85	traces
H. Ain El Bey	Bou Arca	43	2	965	162,94	3776,6	124,02	622	8096	7286	2,8	7,57
H. Ain El Arca	Bou Arca	40	2,5	965	182,4	3776,6	124,02	697	8116	7923	2,7	1,94
Ain Okra (Okra)	Nabul	39	0,3	125,05	59,99	293,34	6,38	124,52	181,45	521,97	0,48	16,7
Ain Fakroun	Nabul	37	1	1027,5	195,5	2654	90	561,2	1338	5927	2,9	1,5
Ain Kalaouta	Nabul	44	1,4	820	182,4	3392,5	49	524,6	2214	5525	3,1	3,1
Ain Sila	Nabul	30	0,7	780	182,4	3888,9	91,2	512,4	1364	5266	2,8	traces
Ain Elida	Nabul	39	24	755,88	181,37	2980	86,41	561,2	1724,09	5780	2,8	traces
Ain Arca	Nabul	38	39	800	240,76	2953,2	80,7	536,8	2310,13	4970	3,2	aba
H. Boua Jafel	Nabul	40	15	829,46	120,4	5520	179,4	414,8	1780	9385	1,5	1,37
Ain Ayel	Zaghouan	18	23,8	117,34	20,22	44,13	1,21	231,9	166,54	56,9	0,47	6,34
H. Zefra	Zaghouan	44	9 à 40	645	145,52	1332,74	24,4	256,2	1770,09	1924,57	2,3	1,41
H. Jafel Oua	Zaghouan	56	3 à 15	992	167,8	4991	167,7	536,8	2814	3094	2,3	
F. oued El Gharbi (Gharbi)	Zaghouan	39	10	117	28	36	3,8	284,3	144	36	0,56	3,5
F. 127542 (Jaghu)	Zaghouan	39	10	125,32	28,59	4039	1,85	268,4	283,05	73,52	0,56	3,26
F. Kasser Fouf	Mahdia	39,6	76	300	150,8	2370	28,75	231,8	2396	3727,5	0,35	nd
Forage Soula (Coral)	Siliana	22	10	102,31	12,56	16,7	0,54	333,12	40,77	37,94	0,22	6,14
Ain Bouaouada	Siliana	20	8	108	3,4	15	1,3	317,2	18,04	35,5	0,21	traces
Forage Boua (H. Milina)	Siliana	19	9	120,49	3,52	20,21	nd	317,2	10,31	40,35	0,34	10,76
H. Bouaoua	Siliana	45	3 à 10	1540	644,5	10506	248,68	1667	3776	33015	0,84	traces
H. Sidi Mouna	Kairouan	34	0,5	1440	364,8	7360	351	500	1607,6	15549	2,1	
Ain Chama	Kairouan	28	5	730	171	4310	145	451,4	1030	7380	1,9	nd
F. Oued Kharouba	Kairouan	23	10	35	10	24	4	170	14	13	0,05	12
F. Kasser Laroua (Foua)	Kairouan	22,2	20	91,38	5,39	19,71	2,81	268,4	24,01	40,08	0,41	12,22
F. Shama (Lama)	Kairouan	25,8	6	561	20	25,46	3,35	229,36	32,47	32,83	0,7	3,5
F. El Houd	Kaf	25	30	87,2	8,86	26,65	0,99	201,9	32,15	36,9	0,42	19,22
Ain Oua Elahar	Kaf	19	11,5	52	19,46	12	5,6	207,4	11	35,5	0,21	0,31
H. Boua	Kaf	50	0,5	528	97,28	4880	30	1880	1047,14	7380	2,35	traces
H. Mellep	Kaf	42	2,5	327,5	91	2783	46,8	639,28	363,5	4527,5	2,05	
Ain Mela (Safa)	Kaf	17	1	75,11	5,84	15,79	0,46	225,35	18,06	21,6	0,78	17,58
F. Sa (S. Safa)	Kaf	21	5	70,22	8,83	17,72	0,46	244,49	1081	24,73	0,67	28,83
Ain El Ajou	Kaf	19,4	variable	92	16,7	20,36	1,89	275,72	47,17	27,23	0,96	29,15
Ain Gaci	Sousse	22	1	108,23	65,21	440,88	10,17	1230,31	122,77	466,89	2,19	1,08
F. Sidi Abdoumal	Sousse	28		252	200	2458	19,5	253,76	1974	4615	1,2	40
F. Ain Boua	Sousse	22	4	136	51,07	255,3	7,41	817,4	79,4	338,3	1,69	1,3
H. Sidi Bouaoua	Kasserine	37	1	240	55,03	280	20	244	736,5	355	1,43	traces
F. Kadi	Kasserine			129	38,91	71,2	2,2	239	391	142	0,01	101
F. Boua El Ghazal (Ghazal)	Sidi Bouazid	21	10	42,37	12,57	9,72	1,71	131,45	34,88	19,04	0,21	traces
Zone W. Baga	Sidi Bouazid	20	nd	55,83	77,9	41,34	6,06	385	104,43	42,42	0,06	0,42
H. Jafra (J. Kadi)	Sidi Bouazid	44	important	706	166,83	680	49	385	2282,76	1189,25	nd	3,1
H. Sidi Ahmed Zarek	Gabès	28	20	240	760	179,24	3480	170	396,4	1817	8514,25	1,34
H. Ain El Bey	Gabès	40	important	426,65	54,2	506,57	99,13	185	1187,05	883,83	0,55	2,64
H. Ain Sidi Abdoukader	Gabès	44	important	500	97	585	80	185	1135	1365	0,45	16
H. Ain Sghira	Gabès	36	important	488	80,25	550	75	170,8	1233	923	0,58	14,4
H. Elazma	Gabès	38,5	1	200	133,7	426,67	13,26	170,8	994	584,5	1,55	22,32
F. El Khajouj	Gabès	38	important	320	82	350	51	97,6	920,36	710	1,55	0,48
Forage Bou El Ain	Khikhi	46	important	280	60,8	360	35	145,5	761	656,75	0,4	1,36
H. Amamk	Khikhi	39	important	280	72,96	585	52,5	170,8	688	887	0,55	aba
H. Mgata	Khikhi	39	important	280	72,96	585	52,5	170,8	688	887	0,55	aba
H. Elouha	Khikhi	39	important	280	72,96	585	52,5	170,8	688	887	0,55	aba
H. El Famer	Khikhi	39	important	280	72,96	585	52,5	170,8	688	887	0,55	aba
H. Sidi Abdoukader	Tunna	75	important	336	38,91	424	40	146,4	1080	387,2	0,05	aba
F. Nafra	Tunna	65	5	820	31,61	500	92,05	170,8	1280,8	405,5	0,76	traces
H. El Boua	Tunna	75	important	372	136,62	648,8	21,4	140,3	1399,2	1080,3	nd	nd
H. Boua	Tunna	80	important	412	77,82	333,52	71,31	227,04	1088,5	497	1,08	8,04
F. Kasserine (Jafra)	Meknesse	23	5	11,45	6,35	16,41	1,85	24,4	36,36	91,84	0,72	20,36
F. Kasserine (Jafra)	Meknesse	23	5 (pompes)	24	17,02	51,34	1,67	46,8	91,94	66,56	0,37	6,7
F. Lou Soua	Meknesse	31,2	30	340	170,24	1900	96	170,8	1274,3	2911	0,58	0
F. El Loua	Meknesse	32	nd	340	158	1880	93	170,8	1435	2893,25	0,52	0
F. Toula Bou Guedra	Meknesse	34	nd	800	394	1880	18,15	181	2472,76	3107,72	0	3,75
F. Touma	Meknesse	30,5	nd	280	194,56	2020	36	183	1316	3395	0,47	0,44
F. Office de Bouaoua	Meknesse	31,2	important	272	136,62	1817	30	182,8	960,3	2804	0,7	28
F. de Touma (Mati)	Tannouba	23	5	52	27,08	24,93	4,9	138,6	77	93,81	2,2	19,73
F. Saghia	Tannouba	23 - 40	important	96,74	59,15	106,32	5,48	244	240	207,2	1	19,14
H. El Houd	Tannouba	37	5	240	146	727	44,4	207,4	942,5	1386		
F. Zefra	Tannouba	64	30-20	601,3	170,48	899,62	17,91	268,4	1076,5	1956	2,8	
F. Mahara	Tannouba	70	20	376,7	45,12	947,01	15,12	207,4	991,8	485,3	0,78	0
F. Mahara El	Tannouba	70	30	369,52	38,75	295,41	84,48	207,4	960,09	480,37	0,82	0
H. Bouaoua	Tannouba	70	25	391,52	40,91	323,11	77,86	239,4	981,26	472,84	0,68	0
Ain Bouaoua	Tannouba	3	68	12,16	18,3	0,5	255	21	25,403	0,29	8,66	
Ain Boua	Tannouba	22	4	136	51,07	225,3	7,41	817,4	76,4	335,5	1,69	1,5
F. Chamaou	Tannouba	39	30	57,55	10,2	62,1	1,95	244	29,47	65,06	0,02	21,26
F. Sidi Bouaoua	Tannouba	48	5	1000	194,56	3738	0,115	458,8	1317	7457,87	3,3	traces

Annexe E - Caractérisation de la composition chimique des sources thermo-minérales de Tunisie.

JEBEL OUST, Tunisie

Tests polliniques 2009-2010

Hervé Richard, UMR 6249, Besançon

Les résultats sont exprimés en nombres de grains de pollen et de spores

Echantillon	JO-07-84	JO-07-112	JO-07-130	JO-07-45	JO-07-52	JO-05-33	JO-07-99	JO-07-103	JO-07-106	JO-07-104	JO-07-107	JO-07-87
Salle	T1	T1	T5	T5	T1	T9	T12	T13	T19	T20	T23	S20 (aqueduc)
<i>Alnus</i>	3	1	3	1	-	-	-	1	-	-	-	-
<i>Corylus</i>	-	-	-	-	-	1	3	1	-	-	-	-
<i>Cedrus</i>	-	-	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-
Ericaceae	-	-	4	1	-	-	3	2	2	6	-	-
<i>Ephedra</i>	1	1	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Fraxinus</i>	-	-	4	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Cupressaceae	-	-	-	-	-	1	2	1	-	-	-	-
<i>Olea europea</i>	65	14	37	32	-	29	51	33	24	35	7	5
<i>Pinus</i>	48	8	2	23	-	16	13	18	120	160	51	1
<i>Pistacia</i>	3	2	5	-	-	4	6	3	3	2	1	-
<i>Phillyrea</i>	-	-	-	2	-	-	4	3	-	-	-	-
<i>Quercus type caduc.</i>	3	2	2	1	-	-	1	-	-	-	-	-
<i>Quercus type suber</i>	1	-	3	1	-	-	-	1	-	-	-	-
<i>Quercus type Ilex</i>	5	4	14	29	-	8	7	5	5	8	3	3
<i>Rhus type</i>	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
Rhamnaceae type	1	-	-	-	-	-	6	3	-	-	-	-
A.P.	131	32	77	93	0	59	96	71	155	212	62	9
Poaceae	28	16	42	28	-	26	28	21	43	65	38	7
Cyperaceae	4	2	4	5	-	1	2	1	1	4	2	-
Céréales type	9	6	8	10	-	6	6	8	23	17	13	2
<i>Plantago type 1 (annulus)</i>	3	2	8	1	-	1	2	2	5	9	4	-
<i>Plantago type 2</i>	-	-	-	-	-	1	1	-	1	2	-	-
<i>Plantago sp.</i>	-	-	-	4	-	-	-	1	-	-	-	-
<i>Papaver</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
<i>Polygonum sp.</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-
<i>Centaurea sp.</i>	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1
<i>Artemisia</i>	6	3	13	8	-	10	10	8	2	1	2	-
<i>Rumex</i>	-	-	3	1	-	3	6	5	-	-	-	-
Chenopodiaceae	28	13	27	33	-	31	26	26	71	93	73	9
<i>Urtica</i>	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Helianthemum</i>	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rubiaceae	-	-	1	1	-	-	-	-	-	1	-	-
<i>Asphodelus type</i>	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
Anthemidae	-	1	4	2	-	1	-	1	-	-	-	-
Cichoriae	14	7	18	18	-	11	13	16	31	37	-	-
<i>Carduus type</i>	-	-	2	-	-	2	1	1	-	-	-	-
Apiaceae	5	2	13	7	-	3	6	3	5	12	4	2
Fabaceae	-	-	-	1	-	-	2	-	-	-	-	-
Brassicaceae	3	2	-	-	-	1	2	1	-	4	-	1
Caryophyllaceae	-	2	-	2	-	-	-	-	1	2	5	2
Dipsacaceae	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ranunculaceae	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
Rosaceae	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1	1	-
Lamiaceae	-	-	-	-	-	-	1	-	1	1	-	-
Liliaceae	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N.A.P.	101	57	145	121	0	98	109	94	184	250	144	24
TOTAL	232	89	222	214	0	157	205	165	339	462	206	33
Indéterminés tricolporés	2	-	7	7	-	2	8	3	1	16	3	3
Indéterminés stéphanocolpés	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-
Indéterminés polyades	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-
<i>Indéterminables</i>	4	1	2	2	-	1	1	2	8	-	10	1
Conservation	---	---	-	+	stérile	---	--	--	+	++	--	---

H.R. 2010

**Annexe F - Résultats de l'analyse palynologique des travertins
du site antique de Jebel Oust, Tunisie.**

Résumé.

Le travertin, connu sous le terme de *lapis tiburtinus* dans l'Antiquité romaine, est une roche issue de la précipitation du carbonate dissous dans les eaux de sources chaudes (travertins) ou froides (tufs calcaires), sous l'influence de processus physico-chimiques et/ou biologiques. Ce phénomène est décrit dès l'époque gréco-romaine par les auteurs antiques (Strabon, Pline l'Ancien, Vitruve), qui témoignent d'une roche qui se forme sous leurs yeux, qui dessine le paysage et qui est largement exploitée pour la construction (p. ex. le Colisée à Rome, le Temple grec de Ségeste en Sicile). Abondamment répartis à la surface de la Terre et caractérisés par une certaine diversité morphologique, les travertins représentent d'excellents enregistreurs des conditions climatiques et hydrologiques de leur dépôt, offrant un potentiel très fiable d'archives sédimentaires utilisées au sein de problématiques paléoenvironnementales.

La notion de *travertins anthropiques* définie ici prend en compte l'influence de l'Homme sur ces formations sédimentaires et les eaux qui leur sont associées. Elle est illustrée par une approche géoarchéologique des dépôts de travertins préservés sur le site antique de Jebel Oust, en Tunisie, où l'exploitation d'une source chaude est attestée depuis le début de notre ère jusqu'à son tarissement dès la fin de l'Antiquité tardive. La source thermique surgissant sur le versant oriental de la montagne fut l'objet d'un culte aux époques romaine puis paléochrétienne et alimentait en eau chaude, par le biais d'un aqueduc, un édifice thermal localisé en aval. Notre approche géoarchéologique met en lumière l'anthropisation du versant qui se traduit par un contrôle du fonctionnement de la source chaude et des dynamiques sédimentaires associées. En parallèle, l'analyse des travertins préservés au sein des structures antiques révèle des informations primordiales sur les conditions de déroulement du culte et sur les pratiques balnéaires (fonction des salles thermales, gestion de l'eau, phases de réfection, états d'abandon).

Une vision plus générale d'une géoarchéologie des *travertins anthropiques* propose une nouvelle approche des problématiques liées à l'eau, en insistant sur la gestion plus ou moins complexe d'une source carbonatée, chaude ou froide, et en précisant le degré d'impact humain sur le développement des travertins.

Mots-clés : géoarchéologie, travertins, tufs calcaires, Antiquité, Tunisie, Jebel Oust, source chaude, impact anthropique, anthropisation de l'environnement, culte des eaux, sanctuaire de source, thermes romains, aqueduc, géochimie des carbonates, isotopes stables, auteurs antiques.

Abstract.

Travertines, known as *lapis tiburtinus* during Roman times, are continental limestones precipitated in calcareous environments from thermal waters of hot springs (travertine) or cool waters of karstic springs (calcareous tufa). This phenomenon is well-known during Classical Antiquity and had been described by several ancient authors (Strabo, Pliny the Elder, Vitruvius) who depicted a stone that forms extremely rapidly, a stone that outlines the landscape and which is largely used for construction (e.g. The Colosseum in Roma, the Greek temple at Segesta in Sicily). These deposits are widespread on Earth's surface showing various morphologies and are great sedimentary records of climatic and hydrologic conditions. Thus they represent valuable proxies for palaeoenvironmental studies.

The notion of *anthropogenic travertines* takes into consideration human impact on these deposits and on travertine-depositing waters. It is documented by the study of the roman site of Jebel Oust, Tunisia, where the exploitation of a hot spring is attested from the first century A.D. to the end of Late Antiquity. The site is characterized by a temple settled around the spring's vent associated with Roman baths located downstream and supplied with hot water via an aqueduct. Our geoarchaeological approach brings to light the anthropization of the regional geosystem expressed by an entire control over the hot spring and its associated deposits. Furthermore the study of travertines preserved in the archaeological structures reveals precious and original information about water cult and bathing practices during Antiquity (thermal rooms function, water management, repair phases, states of neglect and decay).

Moreover, geoarchaeology of *anthropogenic travertines* intends to offer a new approach of research's problematic dealing with water managements and integrating human impact on travertine's development.

Keywords : geoarchaeology, travertine, calcareous tufa, Antiquity, Tunisia, Jebel Oust, hot spring, human impact, environment anthropization, water cult, spring sanctuary, Roman baths, aqueduct, carbonates sedimentology and geochemistry, stable isotopes, ancient authors.